

Trübemitführung feiner hydrophiler Teilchen in mechanischen
Flotationsapparaten und deren Reduzierung
Einfluß der wichtigen Prozeßparameter und der Modifizierung
des Suspensionszustandes sowie des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von M.Eng. Elzivir Azevedo Guerra

geboren am 19.03.1958 in Arcoverde, Pernambuco, Brasilien

Gutachter: Prof. em. Dr.sc.techn. Dres.h.c. Heinrich Schubert, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weiß, Dresden

Tag der Verleihung: Freiberg, den 28.06.2001

Meinen Eltern Edilazir und Israel, meiner Frau Lucie und meiner Tochter Elisa

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde während meiner Tätigkeit am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg angefertigt, wo ich als Stipendiat der Koordinationsstelle für wissenschaftliche Aus- und Fortbildung des Brasilianischen Erziehungsministeriums (CAPES) und als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig war.

Herrn Prof. em. Dr. sc. techn. Dres. h. c. Heinrich Schubert gilt mein besonderer Dank für die Aufnahme am Institut, die Möglichkeit das Thema dieser Arbeit weitgehend selbständig bearbeiten zu können, die zahlreichen Gespräche, die kritische Begleitung und die gewährte Betreuung sowie die sorgfältige Durchsicht des Manuskriptes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert möchte ich für die Weiterbeschäftigung am Institut, die Bereitstellung der Instituts Einrichtungen, die Antragstellung für das DFG-Forschungsprojekt „Flotation und Entrainment“ und die Übernahme des Korreferates danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Weiß danke ich für die wertvollen Beratungen und Gespräche sowie die wichtigen Hinweise und Ratschläge zur Turbulenzmessung, sein Interesse an dieser Arbeit und die freundliche Übernahme des Korreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Horst Baldauf für die wichtige, freundliche und verständnisvolle Unterstützung und die zahlreichen Diskussionen, die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die hilfreichen Hinweise zur Überwindung bürokratischer Hindernisse. Hier gilt auch Frau Dr.-Ing. Barbara Larisch mein besonderer Dank für die unendliche Bereitschaft zur kurzfristigen Deutschkorrektur des Manuskriptes und für die freundliche Unterstützung. Bedanken möchte ich mich gleichzeitig herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen I. Schoenherr für die stete Hilfsbereitschaft und Korrektur des Manuskriptes.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Hansjoachim Stechemesser und Herrn Dipl.-Ing. Heinz-Hermann Wolf für die freundliche Unterstützung am Anfang dieser Arbeit, die vorübergehende Aufnahme in der Forschungsgruppe „Flotation“ und die wichtigen Hinweise sowie Ratschläge zur Vorbereitung und Präzisierung des beantragten Forschungsprojektes „Flotation und Entrainment“ bei der DFG.

Diese Arbeit wäre ohne Hilfe der Werkstatt nicht zustande gekommen. Herrn Gert Talkenberger und Frau Ingeborg Butze danke ich für die Anfertigung der Versuchsanlage und zahlreiche Reparaturen der Flotationszellen.

Herr Dr. rer. nat. Bernd Ullrich half mir bei den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen. Herr Dr.-Ing. Reinhard Herbig hat die Zeta-Potential-Messungen durchgeführt. Herr Dr.-Ing.

Danksagung

José Contreras Gamero unterstützte mich bei den Turbulenzmessungen mit der Laser-Doppler-Anemometrie-Methode. Frau Christa Dusdorf und Rosemarie Thomas haben die chemische Zusammensetzung des Versuchsguts bestimmt. Frau Dipl.-Ing.(FH) Beate Wahl, Frau Annett Kästner, Frau Marie Baldauf und Frau Elke Starke unterstützten mich bei der Korngrößenanalyse mittels Laserbeugungsgerät. Frau Monika Teichmann hat die Messungen der scheinbaren Viskosität durchgeführt. Frau Karin Meyer, die studentischen Hilfskräfte Frau Ramatu Leeder-Kamanda, Frau Gritt Ebermann und die Herren Andreas Dittrich, Falk Silbermann, A. Heinzel, El Mostafa El Hamin sowie Herr Dipl.-Geol. Götz Leeder-Kamanda halfen mir bei der Durchführung der Flotationsversuche und Siebklassierung. Frau Dr.-Ing. Claudia Schöne unterstützte mich bei den bürokratischen Aufgaben im Rahmen des Forschungsprojektes „Entrainment und Flotation“. Herr Dr.-Ing. Mamadou Fall und Frau Dipl.-Kffr. Anja Helbig halfen mir bei der Bildbearbeitung. Herr Dr.-Ing. Sekou Conde half mir bei kurzfristiger Korrektur des Manuskriptes. Frau Monika Wenige half mir durch das Tippen eines Teils des Manuskriptes. Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Allen Mitarbeitern des Instituts danke ich für ihre Hilfsbereitschaft und das gute Arbeitsklima.

Für die Hilfsbereitschaft und Betreuung zur Verlängerung der Aufenthaltsgenehmigung im Jahr 2000 möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Husemann, Herrn Dr. rer. nat. Bernd Kubier und Herrn Dr. rer. nat. Bernd Hoffmann herzlich danken.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. habil. K.-J. Schulze und seiner Mannschaft (Uniklinikum TU Dresden, Klinik und Poliklinik für Orthopädie), insbesondere Herrn Dr. D. Wubtaye für die erfolgreiche medizinische Behandlung meiner schweren Krankheit, die mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit weiterzuführen und zu beenden.

Meinen Freunden und Bekannten danke ich für die guten Zeiten, die wir hier in Freiberg gemeinsam erlebt haben und die ich immer in meinem Gedächtnis bewahren werde.

Für Ihre Geduld und das Zusammenleben während der Durchführung dieser Arbeit bin ich meiner Frau Lucie und meiner Tochter Elisa sehr dankbar.

Für die finanzielle Unterstützung danke ich der CAPES, der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die das Forschungsprojekt "Entrainment und Flotation" und den Sonderforschungsbereich 285 „Partikelwechselwirkungen bei Prozessen der Mechanischen Verfahrenstechnik“ (Teilprojektes B1) förderte, der Familie de Lannoy (Christian, Lionela und Letizia) und der Familie Azevedo Guerra sowie der Organisation Zebra Kontaktstelle für Aus- und Inland (Radebeul).

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Gegenwärtiger Kenntnisstand zur Trübe mitführung	3
2.1 Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten	3
2.1.1 Kennzeichnung der Trübe mitführung und Methoden zu deren meßtechnischer Erfassung.....	10
2.1.1.1 Bestimmung des Trübe mitführungsfaktors.....	11
2.1.1.2 Experimentelle Methoden zur Bestimmung des Ausbringens durch Trübe mitführung und Heterokoagulation in mechanischen Flotationsapparaten.....	18
2.1.2 Wichtige Einflußfaktoren auf die Trübe mitführung.....	24
2.1.2.1 Wasserausbringen.....	25
2.1.2.2 Teilcheneigenschaften.....	27
2.1.2.3 Zusammensetzung der Aufgabetrübe.....	28
2.1.2.4 Feststoffmasseanteil in der Trübe.....	29
2.1.2.5 Schaumentwässerung, -höhe und -verweilzeit.....	29
2.1.2.6 Schaumeigenschaften und weitere Vorgänge in der Schaumzone.....	30
2.1.2.7 Luftvolumenstrom.....	33
2.1.3 Bisherige Ergebnisse zur Reduzierung der Trübe mitführung.....	36
2.2 Wichtige Aspekte der Turbulenz für die Flotation und Flockung	40
2.2.1 Kennzeichnung der turbulenten Strömung.....	40
2.2.2 Suspendierung des Feststoffs in mechanischen Flotationsapparaten.....	42
2.2.3 Einfluß der Feststoffteilchen auf die Turbulenz.....	43
2.2.4 Luftdispergierung.....	44
2.2.5 Hydrodynamische Charakterisierung der Makroprozesse in mechanischen Flotationsapparaten.....	45
2.3 Flockung mineralischer Feststoffe	47
2.3.1 Polymere.....	48
2.3.2 Wichtige Einflußgrößen auf die Flockung sowie Größe, Struktur und Form der Flocken.....	49
3 Versuchsdurchführung	51
3.1 Standardflotationssystem und –Versuchsbedingungen	51
3.1.1 Beschreibung der Versuchsanlage.....	51
3.1.2 Verwendete Materialien.....	53
3.1.3 Standard-Versuchsbedingungen.....	55
3.1.4 Bestimmung des Feststoffausbringens durch Trübe mitführung.....	56
3.2 Untersuchungen zur Wirkung der Beeinflussung des Suspensionszustandes	57
3.2.1 Messung des Feststoffkonzentrationsprofils in Abhängigkeit von der Zellenhöhe.....	58
3.2.2 Modifizierung der Turbulenz in der Trübezone.....	60
3.2.2.1 Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme.....	60
3.2.2.2 Rosteinbauten.....	61
3.2.2.3 Zellengeometrie.....	62
3.2.2.4 Synergetische Wirkung der Zellengeometrie und Rosteinbauten.....	65
3.2.2.5 Turbulenzmessung.....	65

3.3	Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen.....	69
3.3.1	Beurteilung des Flockungszustandes.....	69
3.2.1.1	Absetzversuche mit den Quarzsuspensionen.....	69
3.2.1.2	Zeta-Potential-Messungen.....	71
3.2.2	Flotation mit geflocktem Quarz.....	72
4	Ergebnisse und Diskussion.....	73
4.1	Methodische Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Trü- bemitführung.....	73
4.2	Wirkung wichtiger Einflußgrößen auf die Trübemitführung.....	76
4.2.1	Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabetrübe.....	76
4.2.2	Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes.....	80
4.2.3	Einfluß der Schaumhöhe.....	84
4.2.4	Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe.....	87
4.3	Schlußfolgerungen zu den bisherigen Ergebnissen.....	90
4.4	Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Suspensionszustandes...	92
4.4.1	Feststoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Zellenhöhe.....	92
4.4.2	Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung der Turbulenz in der Trübe- zone.....	95
4.4.2.1	Einfluß der Anwendung verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme.....	95
4.4.2.2	Einfluß der Anwendung von Beruhigungseinbauten (Rost).....	97
4.4.2.3	Einfluß der Änderung der Zellengeometrie mit Variation des Leistungseintrages...	106
4.4.2.4	Einfluß der synergetischen Wirkung der Kombination der Änderung der Zellen- geometrie mit Anwendung von Rosteinbauten.....	116
4.4.2.5	Turbulenzmessungen in Zellen mit einem Verhältnis- $H/D_1 = 1,0$ und $2,8$	119
4.5	Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen.....	124
4.5.1	Absetzversuche mit Quarzsuspensionen.....	125
4.5.2	Zeta-Potential-Messungen.....	129
4.5.3	Flotation mit geflocktem Quarz.....	130
5	Schlußfolgerungen.....	136
6	Zusammenfassung.....	142
7	Symbolverzeichnis.....	145
8	Literaturverzeichnis.....	150
	Verzeichnis der Anlage.....	162

1 Einleitung

Nachdem viele reiche mineralische Lagerstätten erschöpft sind, ist es heute eine wichtige Aufgabe der Mineralaufbereitung, geringhaltige, fein verwachsene und komplexe Rohstoffe anzureichern. Auch beim Recycling von sekundären Rohstoffen (Altpapieraufbereitung, Bodensanierung sowie Prozeß- und Abwasseraufbereitung) spielt die Trennung der feinsten Teilchen eine signifikante Rolle. In diesem Zusammenhang hat sich die Flotation zum bedeutendsten Prozeß für die Fein- und Feinstteilchensortierung entwickelt. Allerdings sind auch hierbei wegen ihrer geringen Masse und hohen spezifischen Oberfläche nachteilige Wirkungen der Feinstteilchen auf die Kinetik und Trennschärfe nicht auszuschließen [1 bis 18]. Daher ist es eine wichtige Aufgabe, die Trennschärfe der Flotation in diesem Teilchengößenbereich zu verbessern. Insbesondere die sogenannte Trübeimführung¹ feiner hydrophiler Teilchen in den Schaum und das Schaumprodukt führt vielfach zu einer Beeinträchtigung der Konzentratqualität bzw. Selektivität des Prozesses. Einen großen Einfluß hat diese vor allem in mechanischen Flotationsapparaten [1, 2, 4, 10, 9 bis 54], in denen bekanntlich das Querstrom-Prinzip verwirklicht wird. In den letzten Jahren werden zunehmend Flotationskolonnen eingesetzt, in denen die Trübeimführung durch Realisierung des Gegenstrom-Prinzips weitestgehend reduziert werden kann [1, 55 bis 64]. Dennoch dürften mechanische Flotationsapparate wegen anderer Vorteile (Robustheit, geringere Empfindlichkeit gegenüber Aufgabeschwankungen u.a.) ihre dominierende Stellung im industriellen Maßstab behalten. Deshalb wird der Trübeimführung in mechanischen Flotationsapparaten in den letzten Jahren steigende Beachtung geschenkt [1, 14, 19 bis 23, 31 bis 47, 65, bis 71].

Bisherige Veröffentlichungen über die Trübeimführung in mechanischen Flotationsapparaten diskutieren und bewerten die Wirkung verschiedener Einflußgrößen, ihres Beitrags zum Gesamtausbringen sowie ihres Einflusses auf die Trennschärfe [1, 10, 19, 21, 22, 31, 33 bis 54, 67, 68, 70 bis 72]. Sie beschreiben empirische Modelle und konzentrieren sich vorrangig auf die Reduzierung der Trübeimführung durch die Beeinflussung des Schaumsystems. Ungenügend ausgearbeitet sind bisher die meßtechnischen Methoden zur getrennten Erfassung von Trübeimführung und Heterokoagulation (Anhaften hydrophober bzw. hydrophobierter Teilchen an Gasblasen) am Gesamtausbringen eines Flotationsprozesses [10, 32 bis 38, 71] sowie die Modellierung der Trübeimführung [21, 22, 33, 34, 42, 43, 50, 51, 67, 71, 73]. Außerdem sind weitere Untersuchungen zum Einfluß wichtiger Parameter erforderlich [14, 19 bis 23, 37, 71]. Nicht ge-

¹ Im Englischen spricht man vom *Entrainment*.

klärt ist die Rolle des Turbulenzzustandes in der Trübeschicht unterhalb der Schaumzone. Bisher ist die Wirkung des Flockungs- bzw. Dispergierungszustandes unter besonderer Berücksichtigung der selektiven Flockung hydrophiler Teilchen auf die Trübemitführung nicht untersucht worden. Generell bedarf es der geschlossenen Darstellung der Mechanismen der Trübemitführung [14, 21, 22, 37, 71].

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, mit Hilfe einer neu entwickelten Methode zur getrennten Bestimmung des Feststoffausbringens durch Trübemitführung und Heterokoagulation die Wirkung einiger wichtiger Prozeßparameter, und zwar der Zusammensetzung der Aufgabetrübe, des spezifischen Luftvolumenstromes, der Schaumhöhe und des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe, weiter zu bewerten. Darüber hinaus ist der Einfluß der Modifizierung des Suspensionszustandes (Änderung der Turbulenzintensität) bzw. des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen (Quarz) auf die Trübemitführung feiner hydrophiler Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten aufzuklären. Die Wirkung der Modifizierung der Turbulenzintensität in der Trübe direkt unterhalb der Schaumzone wurde durch Anwendung verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme, Verwendung von Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie in Zusammenhang mit der Variation des Leistungseintrags und in Kombination mit Rosteinbauten untersucht. Weiterhin sollte aufgezeigt werden, wie und bei welchen Bedingungen eine Steuerung und Reduzierung der Trübemitführung erreicht werden kann.

Die Untersuchungen sind in mechanischen Laborflotationszellen mit synthetischen Mischungen vom Fluorit/Quarz als Versuchsgut durchgeführt worden.

Die Erweiterung der Kenntnisse über die Mechanismen der Trübemitführung in mechanischen Flotationsapparaten liefert wesentliche Hinweise zur Steuerung und Reduzierung der Trübemitführung. Die Arbeit leistet damit einen Beitrag zur Optimierung der Feinstteilchenflotation bei der Aufbereitung komplex zusammengesetzter, wertstoffarmer Rohstoffe und beim Recycling von festen Abfällen.

2 Gegenwärtiger Kenntnisstand zur Trübe mitführung

Wegen ihrer dominierenden Stellung in der Flotationspraxis sowie der mittels des Gegenstromprinzips verminderten oder vermiedenen Trübe mitführung in Flotationskolonnen sind die Ausführungen über den gegenwärtigen Kenntnisstand der Trübe mitführung in diesem Abschnitt auf die Verhältnisse und Bedingungen in mechanischen Flotationsapparaten beschränkt. In diesem Zusammenhang werden wichtige Aspekte der Turbulenz beim Flotationsprozeß (Suspendieren der Feststoffteilchen, Luftdispergierung, Turbulenzdämpfung durch Feststoffteilchen) und der Flockung mineralischer Feststoffteilchen dargestellt.

2.1 Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten

In einer Reihe von Publikationen werden als die hauptsächlichen Mechanismen des Feststoffausbringens bei der Flotation feiner und feinsten Teilchen die Heterokoagulation (echte Flotation), die Trübe mitführung (*entrainment*²), die Einschließung (*entrapment*²) und Schlammüberzüge (*slime coatings*²) genannt [1, 9, 10, 21, 22, 33 bis 54, 68, 71, 72, 74 bis 77]. Bild 2.1 zeigt eine schematische Darstellung dieser Mechanismen im Flotationsprozeß und erläutert die Begriffe Trübe mitführung und Einschließung.

Unter Ausbringen durch Heterokoagulation (echte Flotation) ist der Übergang der Feststoffe durch das Aufsteigen der an den Blasen anhaftenden hydrophoben oder hydrophobierten Teilchen aus der Trübezone über die Trübe-Schaum-Grenze und Schaumzone ins Schaumprodukt zu verstehen (Bild 2.1a und 2.1b). Dieser Ausbringensmechanismus ist selektiv, d. h., durch Heterokoagulation werden nur hydrophobe oder hydrophobierte Teilchen ins Schaumprodukt eingebracht [1, 10, 13, 14, 21, 22, 33, 35, 42 bis 47, 50, 68, 71, 72].

Unter Trübe mitführung ist der Mikroprozess zu verstehen, mit dem Trübe in die Lamellen des Flotationsschaums gelangt, sich mit diesem aufwärts bewegt und schließlich ins Konzentrat ausgetragen wird (Bild 2.1a und 2.1b). In der in den Schaum gelangten Trübe sind feinste Feststoffteilchen unabhängig von ihrem Hydrophobierungs- bzw. Hydrophilierungszustand mehr oder weniger homogen suspendiert. Im allgemeinen wird in der Literatur die Auffassung vertreten, daß die Zusammensetzung der in den Schaumlamellen befindlichen Trübe, die aus der Trübezone von unten in den Schaum eintritt, näherungsweise jener der Suspension in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumschicht entspricht [1, 4, 21, 23, 34 bis 36, 51, 52, 54, 67, 68, 71, 72, 78, 79]. Bisher fehlt jedoch ein experimenteller Nachweis für diese Annahme.

² Begriffe in Englisch

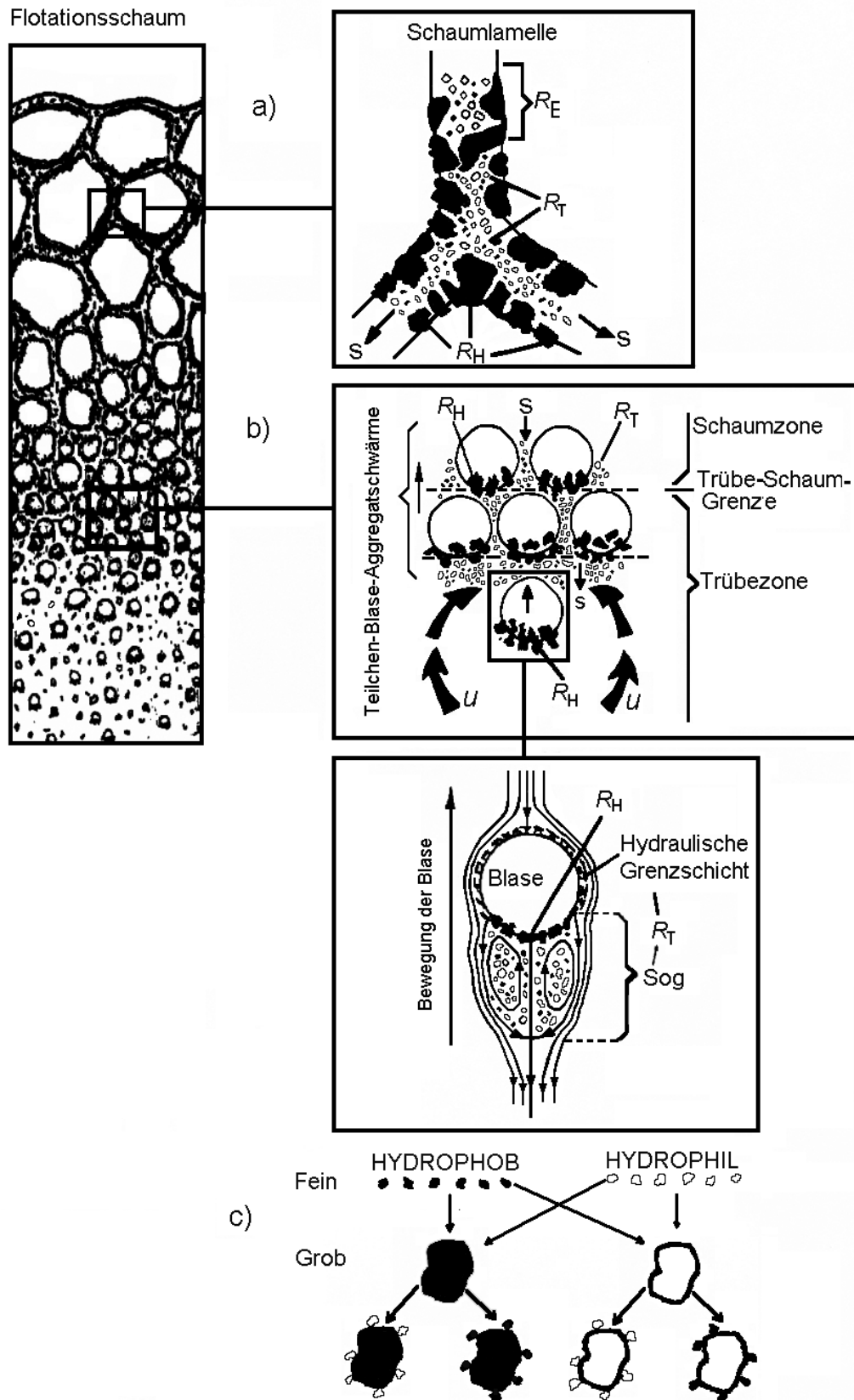


Bild 2.1: Schematische Darstellung der Ausbringensmechanismen der festen Stoffe im Flotationsprozeß: a) in der Schaumzone; b) in der Trübezone und Trübe-Schaum-Grenze und c) Bildungsmöglichkeiten der Schlammüberzüge

■ Hydrophobe Teilchen ○ Hydrophile Teilchen → Bewegungsrichtung ○ Blase
 R_H : Heterokoagulation R_T : Trübe mitführung R_E : Einschließung S: Schaumentwässerung
 u: turbulente Strömungsgeschwindigkeit

Aus dem von *Schubert und Mitarbeitern* [1, 14, 80 bis 85] entwickelten Suspensionsmodell zum turbulenten Teilchentransport in einem Trübebehälter können die Konzentrationsprofile in Kraftfeld-Richtung in Abhängigkeit von den Teilchengrößen (s. Bild 2.2) abgeleitet werden. Auf Grundlage dieser Modellvorstellungen lassen sich aber wegen der stark vereinfachenden Annahmen (insbesondere „homogene“ Turbulenz) nur qualitative Schlußfolgerungen ziehen. Infolgedessen kann man sagen, daß in mechanischen Flotationsapparaten für feinste Teilchen (kleiner ca. 5 bis 15 μm in Abhängigkeit von der Teilchendichte) eine homogene Suspendierung eintritt [1, 10, 14, 21, 22, 33, 42, 45]. Für grobe Teilchen dagegen ergeben sich näherungsweise exponentielle Konzentrationsprofile. Folglich gehen die feinsten Feststoffteilchen aus der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone proportional ihrer mittleren Konzentration im Prozeßraum in den Schaum über, während die gröberen zunehmend unterproportional ausgetragen werden [1, 14, 72, 81 bis 85]. Dennoch kann auch eine Änderung der Zusammensetzung der Trübe im Schaum nahe der Trübe-Schaum-Grenze im Vergleich zur dem Bereich der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone eintreten. Dies ist auf Abweichungen der Feststoffkonzentration im oberen Teil der Trübezone von der idealen Mischung sowie auf die verlangsamte Geschwindigkeit, das Zusammendrängen und die Koaleszenz der Teilchen-Blase-Aggregate beim Eintritt in die Trübe-Schaum-Grenze zurückzuführen.

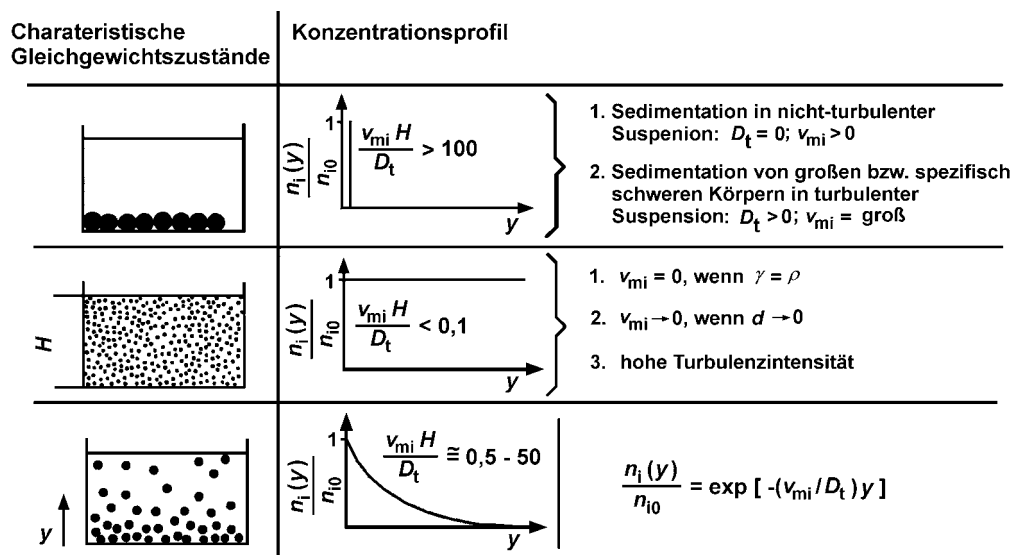


Bild 2.2: Schematische Darstellung der Gleichgewichtszustände der Teilchenkonzentrationsprofile in verdünnten Suspensionen [84] (s. Symbolverzeichnis)

Aufgrund dieser Modellvorstellungen kann man sagen, daß die Primärursache der Trübe mitführung die Tendenz der Teilchen mit niedriger Trägheit, unter den vorherrschend turbulenten Bedingungen in der Trübezone der mechanischen Flotationsapparate der turbulenten Fluidströmungen praktisch ohne Schlupf zu folgen, ist. Deshalb stellt sich eine homogene Sus-

pension dieser Teilchen (leichte und feinste Teilchen) im Bereich direkt unterhalb der Trübe-Schaum-Grenze ein. Die aufsteigenden Teilchen-Blase-Aggregatschwärme strömen in Richtung Trübe-Schaum-Grenze quer zu den Suspensionsströmungen. Der beladene Blasen-schwarm treibt gleichzeitig die Trübe (wäßrige Lösung mit Feststoffteilchen) in seinem Zwischenraumvolumen mit aufwärts (s. Bild 2.1b). Durch diese Bewegung der beladenen Blasen-schwärme wird die ursprüngliche Trübe-Schaum-Grenze nach oben verschoben und zunächst ein beladener Kugelschaum gebildet, der durch hohen Wassergehalt und relativ freie Bewegung der beladenen Blasen charakterisiert ist. Die nachfolgenden aufsteigenden beladenen Blasenschwärme bilden die neue Grenze. Simultan dazu beginnt die Trübe im Zwischenraumvolumen der beladenen Blasen, bedingt durch die wirkende Schwerkraft und infolge der Koaleszenz der Blasen, in die Trübezone zurückzufließen (Schaumentwässerung und verschiedene Sedimentationsgeschwindigkeiten der Teilchen). Deshalb ist der Strom einer engen Teilchengrößenklasse in den Schaum durch Trübemithführung einerseits vom Strom der Gesamtblasenoberfläche (Luftmenge, Blasengrößenverteilung, Gasgehalt) und andererseits auch von der Konzentration der Teilchengrößenklasse in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumschicht abhängig. Mit fortschreitender Entwässerung des Schaumes und Blasenkoaleszenz entsteht dann daraus der Lamellenstrukturschaum, der einen Verband polyedrisch geformter beladenen Blasen darstellt. In diesem Verband haben die beladenen Blasen, die durch die immer dünner werdenden Trübefilme (Lamellen) getrennt sind, ihre Selbständigkeit verloren. Ein Teil der in den Lamellen befindlichen Trübe strömt weiter unter dem Kapillardruck in die *Gibbs*-Kanäle oder *Plateau*-Ränder (Verbindungslinie von drei Blasen) hinein und durch das Netzwerk von *Gibbs*-Kanälen wegen der Schwerkraft ab. Der andere Teil fließt durch die Aufwärtsbewegung des Schaumes auf Grund des Auftriebs der beladenen Blasen und der mit den Blasen verbundenen Trübe (hydraulische Grenzschicht) bzw. durch die „Einschließung“ nach oben und wird schließlich ins Schaumprodukt abgezogen. Außerdem verringert sich das Fließverhalten und die Beweglichkeit des Schaumes wegen der Schaumstruktur und der Erhöhung des Verhältnisses Feststoffteilchen zu Wasser. Die Blasenoberfläche pro Schaumvolumen vermindert sich in diesem Bereich der Schaumzone durch die weitere Blasenkoaleszenz, und dadurch erhöht sich die Möglichkeit des Ausbringens der Feststoffteilchen durch „Einschließung“ [1, 4, 21, 22, 23, 42, 71, 72, 75].

Den hier dargestellten Mechanismus der Trübemithführung bezeichnet man als Theorie des Blasenschwarms (s. Bild 2.1a und 2.1b) [21, 23, 42]. Es sind noch zwei andere Mechanismen vorgeschlagen worden, um die Trübemithführung zu erklären. Danach soll die Trübe mit suspendierten feinen und feinsten Teilchen im Sog der aufsteigenden Teilchen-Blase-Aggregate

und/oder in der hydraulischen Grenzschicht der aufsteigenden Blasen in den Schaum transportiert werden (Bild 2.1b) [66, 74]. *Smith* und *Warren* [42] haben jedoch nachgewiesen, daß diese Mechanismen allein den existierenden Wassergehalt in den Flotationsschäumen nicht erklären können.

Aus den bisherigen Darstellungen folgt, daß der Suspensionszustand der Feststoffteilchen, die Belüftung (Luftmenge, Luftblasendispergierung bzw. Blasengrößenverteilung) und ihre Wechselwirkungen für die Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten eine wichtige und bestimmende Rolle spielen [1, 14, 23, 42, 50, 68, 70, 71, 86 bis 91]. Der Suspensionszustand wird vom turbulenten Teilchentransport und somit durch die Makroturbulenz gesteuert [1, 14 bis 17, 81 bis 85, 92 bis 98]. Die Belüftung wird hauptsächlich durch die Luftmenge, Oberflächenspannung (Schäumer- und Sammlerkonzentration), Trübeviskosität (Teilchengrößenverteilung, Trübedichte und –temperatur sowie Dispergierungszustand) sowie die turbulente Zerteilung der Luft (Energiedissipationsrate) und somit durch die Mikroturbulenz bestimmt [1, 14, 15, 81 bis 83, 85, 86, 92 bis 98]. Außerdem wirkt die Wechselwirkung zwischen den Teilchen (Flockung) auf die turbulente Strömung [1, 14, 16, 17], dadurch auch auf die Belüftung und folglich auf die Trübe mitführung zurück. Infolgedessen hat die Turbulenz entscheidende Bedeutung für die Trübe mitführung [1, 14 bis 18, 23, 82, 83]. Weiterhin sind die Vorgänge in der Schaumzone (Schaumentwässerung, Blasenkoaleszenz, Verweilzeit und Höhe des Schaumes) und in der Trübe-Schaum-Grenze sowie die Schaumeigenschaften (Struktur, Mobilität und Stabilität) von Einfluß [1, 19 bis 22, 42, 43, 45, 50, 67 bis 72, 75, 87 bis 89, 99].

Die Feststoffteilchen in den Schaumlamellen, die zunächst durch die Trübe mitführung in den Schaum oder durch die Blasenkoaleszenz im obersten Bereich der Schaumzone in die Schaumlamellen (Lamellenstrukturschaum) gelangt sind, können durch die an den Blasen haftenden hydrophoben Teilchen bzw. durch die Erhöhung der Wechselwirkung zwischen den Teilchen und den Wänden der *Plateau*-Ränder sowie durch die Verengung der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle mittels Schaumentwässerung eingeschlossen und damit ins Schaumprodukt ausgetragen werden (s. Bild 2.1a). Man bezeichnet diesen Ausbringensmechanismus als “Einschließung” [22, 33, 37, 39, 42, 65, 68, 71, 72, 74 bis 77]. Der Begriff Einschließung wurde geprägt, um das höher als erwartete Ausbringen hydrophiler Teilchen (Ausbringen hydrophiler Teilchen höher als das Wasserausbringen) bei Anwesenheit stark hydrophober Teilchen oder hydrophiler Grobteilchen zu erklären [33, 72]. Weiterhin ist auch die Erhöhung des hydrophilen Teilchengehaltes im Schaumprodukt mit zunehmender Schaumhöhe beim gut entwässerten Schaum durch die Einschließung zu begründen [37, 39, 65, 68, 71]. Das Zurückhalten von hydrophilen Teilchen im Schaumprodukt durch die Einschließung wird bedeutsam,

wenn der Schaum in Höhe des Abzugsniveaus mit einem sehr hohen Feststoffgehalt beladen und gut entwässert ist und/oder wenn er geflockte oder koagulierte sowie grobe Teilchen enthält, die zunächst durch die Trübe mitführung in die Schaumzone ausgebracht sind [22, 42].

Das Ausbringen der Feststoffe aus der Trübezone ins Schaumprodukt durch den Transport der an den Blasen haftenden Aggregate aus Feinst- und Grobteilchen, die durch die Bildung von Schlammüberzügen (slime coatings) entstehen, wird im folgenden kurz als “Schlammüberzüge” bezeichnet. Unter Schlammüberzügen sind im engeren Sinne des Wortes fest haftende Hüllen feinsten Teilchen auf gröberen Teilchen zu verstehen [1, 4, 9, 11, 13, 22, 75, 77]. Diese können sich unter dem Einfluß *Van-der-Waalsscher* Kräfte bei niedrigerem Zeta-Potential unabhängig vom Ladungsvorzeichen ($|\zeta| \leq 15$ mV), hydrophoben Wechselwirkungen oder auch bei unterschiedlichen Ladungsvorzeichen unter der Wirkung elektrostatischer Kräfte sowie durch chemische Wechselwirkungskräfte bilden [1, 9, 11, 13, 75, 77, 100]. Das Bild 2.1c stellt die unterschiedlichen Möglichkeiten der Bildung von Schlammüberzügen dar. Hydrophile Schlammüberzüge auf hydrophoben Teilchen verhindern deren Flotation [38, 101 bis 103]. Bei partieller Bedeckung der hydrophoben Teilchenoberfläche wird die Flotation vermindert und die Qualität der Konzentrate beeinträchtigt [104, 105].

Dem Mechanismus Einschließung können nur Teilchen unterliegen, die zunächst durch Trübe mitführung in den Schaum oder durch die Blasenkoaleszenz in den obersten Bereich der Schaumzone in die Schaumlamellen gelangt sind. Desweiteren ist der Mechanismus Schlammüberzüge nur unter besonderen Bedingungen signifikant. Folglich setzt sich das gesamte Feststoffausbringen im Schaumprodukt in den vorwiegenden Fällen aus den an Blasen haftenden hydrophoben Teilchen (Heterokoagulation) und den durch Trübe mitführung ins Schaumprodukt gelangten Teilchen zusammen (Bild 2.1a und 2.1b). Einerseits führt der Übergang der hydrophilen Teilchen ins Schaumprodukt nicht nur zu einer Beeinträchtigung der Trennschärfe bzw. einer Verschlechterung der Qualität der Konzentrate, sondern bei einer indirekten Flotation, z. B. Deinking-Flotation, zu einem Wertstoffausbringensverlust (Faserausbringen) im Flotationsrückstand (Konzentrat) [106]. Andererseits bewirkt die Trübe mitführung von hydrophoben Teilchen ins Schaumprodukt ein zusätzliches Ausbringen neben der Heterokoagulation. Diese Möglichkeit der Ausbringenssteigerung kann vor allem im Fein- und Feinstteilchenbereich genutzt werden. Ob die Trübe mitführung bei der Feinstteilchenflotation eingeschränkt oder begünstigt werden sollte, hängt von der technologischen Zielstellung ab. Die Reduzierung der Trübe mitführung zur Erzielung einer hohen Konzentratqualität bzw. Selektivität des Prozesses ist insbesondere in der Reinigungsflotation wichtig. Eine Steigerung der Trübe mitführung kann in Sonderfällen zur Maximierung des Ausbringens, beispielsweise

bei der Grund- und Nachflotation, erwünscht sein. In der Regel dürfte jedoch eine Reduzierung der Trübeimführung anzustreben sein.

Insbesondere bei der Flotation armer und feinstverwachsener Rohstoffe spielt deshalb die Steuerung der Trübeimführung eine wesentliche Rolle für den Flotationserfolg. Bei sehr hohen Feinstteilchenanteilen kann die Trübeimführung sogar zum wichtigsten Mechanismus für das Feststoffausbringen im Schaumprodukt werden [10, 22, 31, 33 bis 38, 42, 43, 45, 50, 54]. *Trahar* [10] weist dies am Beispiel einer Siderit-Flotation experimentell nach (Bild 2.3). *Mitrofanov und Mitarbeiter* [48] haben bei der Feinstteilchenflotation von einem Sulfid-Erz festgestellt, daß sich die Steigerung der Trübeimführung hydrophober Teilchen positiv auf den Flotationserfolg auswirkt.

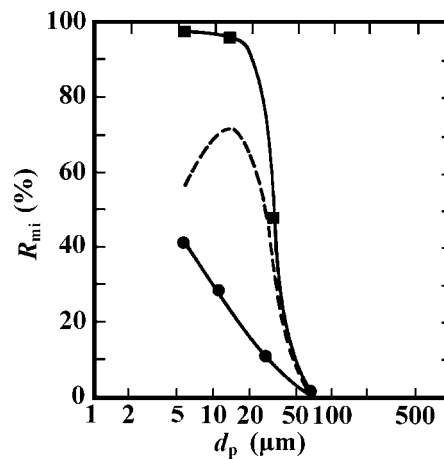


Bild 2.3: Abhängigkeit des Sideritausbringens (R_{mi}) von der Teilchengröße (d_p) [10]

- Ausbringen durch Trübeimführung (nur mit Schäumer)
- Ausbringen durch Heterokoagulation und Trübeimführung (Schäumer mit Sammler)
- - - Ausbringen durch Heterokoagulation (Differenz der Ergebnisse mit Schäumer und Sammler und nur mit Schäumer)

Aus bisherigen Untersuchungsergebnissen zum Einfluß der Trübeimführung bei der Sulfidflotation [10, 23, 46, 50, 65, 86, 107], Oxid-Flotation [10, 23, 28, 54, 107, 108], Silikat-Flotation [10, 22, 28, 31, 39, 50, 108] sowie der Flotation geringlöslicher [4, 10, 28, 51, 65] und leichtlöslicher Salzminerale [28] geht hervor, daß das Ausbringen von Mineralteilchen $>50 \mu m$ durch Trübeimführung unabhängig von ihrem Hydrophilierungszustand unwesentlich ist. Nur bei der Flotation von Kohle [4, 23, 40, 50, 54, 109] sowie anderer Stoffe geringer Dichte ($<1,5 \text{ g/cm}^3$, z. B. Bernstein [28], Kunststoffe und Altpapier [106]) wurden auch Teilchengrößen bis etwa $400 \mu m$ durch den Mechanismus der Trübeimführung beeinflusst. Weiterhin weisen einige Autoren [10, 13, 42, 43, 50, 52] darauf hin, daß die Trübeimführung die untere Grenze der Teilchengröße, die in mechanischen Flotationsapparaten noch selektiv getrennt werden, definiert. Deshalb dürfte es ohne eine deutliche Reduzierung der Trübeimführung kaum gelingen,

die Feinstteilchenflotation in herkömmlichen mechanischen Flotationsapparaten wesentlich zu verbessern.

2.1.1 Kennzeichnung der Trübe mitführung und Methoden zu deren meßtechnischer Erfassung

Obwohl der Mechanismus der Trübe mitführung schon seit langem bekannt ist [75, 76], sind systematische Untersuchungen zur Kennzeichnung und Bewertung ihres Beitrags am Gesamtausbringen, zum Einfluß auf die Trennschärfe sowie zur Wirkung der verschiedenen Einflußgrößen erst viel später aufgenommen worden [4, 10, 19 bis 54, 67, 68, 70 bis 72, 86, 91, 106, 107, 110 bis 119]. Es wurden einige Methoden vorgeschlagen, um die Beiträge der Heterokoagulation und der Trübe mitführung am Gesamtausbringen eines Flotationsprozesses zu bestimmen [10, 21, 22, 33 bis 38, 42, 50, 67, 71, 112, 113, 116]. Bisher bestehen jedoch erhebliche Schwierigkeiten, den Einfluß beider Mechanismen getrennt und genau genug zu erfassen [10, 21, 32, 35, 42].

Allerdings haben schon die ersten Untersuchungen über die Trübe mitführung gezeigt, daß es eine Abhängigkeit zwischen dem Feststoffausbringen im Schaumprodukt durch die Trübe mitführung und dem Wasserausbringen im Schaumprodukt gibt. *Livshits und Bezrodnaya* [115] waren die Ersten, die diese Abhängigkeit bei der Flotation von sulfidischem Kupfer-Blei-Erz im Labormaßstab festgestellt und beschrieben haben. Sie stellten eine lineare Abhängigkeit zwischen Feststoff- und Wasserausbringen sowie den Einfluß der Teilchengröße auf diese Abhängigkeit fest. *Jowett* [54] wies eine lineare Korrelation zwischen der Konzentration der hydrophilen Teilchen im Schaumprodukt und ihrer Konzentration in der Trübezone sowie den Teilchenklassierungseffekt im gebildeten Schaum nach. *Waksmundzki u.a.* [101] fanden bei der Schwefel-Flotation einen linearen Zusammenhang zwischen dem Ausbringen der hydrophilen Teilchen (Calcit im Schaum) und der Dicke der hydraulischen Grenzschicht an den Blasen.

Auf der Grundlage dieser frühen Ergebnisse wird in der Literatur der Trübe mitführungsfaktor oder der Trübe mitführungsgrad vorgeschlagen und genutzt, um die Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten zu charakterisieren [10, 21, 33, 42]. Unter dem Trübe mitführungsfaktor ist das Verhältnis des Ausbringens einer Teilchengrößenklasse des Minerals j durch die Trübe mitführung zum Wasserausbringen ins Schaumprodukt zu verstehen. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung des Trübe mitführungsfaktors vorgeschlagen, die im folgenden Abschnitt erläutert werden. Alle diese Trübe mitführungsfaktoren variieren von 0 (keine Trübe mitführung) bis 1 (maximale Trübe mitführung). Der Trübe mitführungsfaktor 1 bedeutet, daß die Feststoffkonzentration der i -ten Teilchengrößenklasse in der Trübe im Bereich direkt unterhalb des Schaums, in der Schaumzone und in dem Schaumprodukt konstant bleibt, z. B. bei feins-

ten hydrophilen Teilchen. Ergibt sich ein Trübe mitführungsfaktor >1 , ist ein Teil der Feststoffteilchen in der Schaumzone durch Einschließung ins Schaumprodukt ausgetragen worden [22, 42, 68, 72, 124].

2.1.1.1 Bestimmung des Trübe mitführungsfaktors

In Tabelle 2.1a und 2.1b sind unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung des Trübe mitführungsfaktors in mechanischen Flotationsapparaten und charakteristische Werte dargestellt, die aus verschiedenen Modellvorstellungen und den experimentellen Ergebnissen abgeleitet sind. Die unterschiedlichen Werte sind darauf zurückzuführen, daß verschiedene Einflußgrößen und Vorgänge in der Trübe- und Schaumzone in den Trübe mitführungsfaktor einbezogen und die Begriffe Ausbringen des Feststoffs durch die Trübe mitführung und des Wassers unterschiedlich definiert werden [42].

Generell ist der Einfluß der Teilchengröße in die unterschiedlich bestimmten Trübe mitführungsfaktoren eingeschlossen. Sie nehmen mit abnehmender Teilchengröße zu (s. Tabelle 2.1b). Vor der näheren Erläuterung der benutzten Faktoren ist zu bemerken, daß viele Autoren [21, 34, 36, 42, 49 bis 52, 54, 68, 71, 112, 113, 116] in der englischen Fachliteratur die Schaumzone als eine Kolonne betrachten, in welcher eine Trennung der Feststoffteilchen auf der Basis der Teilchengröße stattfindet („Stromklassierung“ oder „Hydroklassierung“). Nach diesen Autoren wird diese Trennung der Feststoffteilchen durch die Schaumentwässerung und durch die Aufwärtsgeschwindigkeit der Flüssigkeit in den Schaumlamellen bestimmt [21, 36, 39, 49 bis 52, 54] und findet vorwiegend an der Trübe-Schaum-Grenze statt, wo der Wasservolumenanteil des Schaumes maximal und die Aufwärtsgeschwindigkeit der Flüssigkeit minimal ist [42, 68, 78]. Jedoch ist diese Anwendung des Terminus „Stromklassierung“ und „Hydroklassierung“ zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Feststoffteilchen in der Schaumzone, die durch die Trübe mitführung in den Schaum gelangt sind, nicht gerechtfertigt, weil das Bewegungsverhalten dieser Teilchen in der Schaumzone infolge der Einschließung, des durch Schaumentwässerung verursachten Rückflusses der Teilchen, der Blasenkoaleszenz und der Schaumstruktur nicht durch das Stromklassierungsprinzip erklärt werden kann.

Der auf die Trübe bezogene Stromklassierungsfaktor (*Classification Funktion*) CF_{ij} wurde von Johnson u. a. [52] vorgeschlagen, um die „Hydroklassierung“ der freien Gangartteilchen in der Schaumzone, die durch Trübe mitführung in den Schaum gelangt sind, zu beschreiben und zu quantifizieren. CF_{ij} -Werte drücken die Wirksamkeit des Wassers für den Transport der i -ten Teilchengrößenklassen der freien Gangartteilchen j durch die Schaumzone ins Schaumprodukt aus [42 bis 52].

Tabelle 2.1a: Darstellung der unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung des Trübemitführungsfaktors der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j, die durch die Trübemitführung ins Schaumprodukt gelangt ist, in mechanischen Flotationsapparaten

Symbol	Bezeichnung	Ansätze		Bedeutung der Symbole
CF_{ij}	Stromklassierungsfaktor der i-ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j, bezogen auf die Trübe	$CF_{ij} = \frac{m_{ij,k} / m_{w,k}}{m_{ij,t} / m_{w,t}}$		$m_{ij,k}$, $m_{w,k}$ = Masse der i-ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j bzw. Masse des Wassers im Schaumprodukt (g) $m_{ij,t}$, $m_{w,t}$ = Masse der i-ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j bzw. Masse des Wassers in der Trübezone (g)
CR_{ij}	Stromklassierungsfaktor der i-ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j, bezogen auf die mittlere Schaumverweilzeit	$CR_{ij} = \frac{1 + \alpha \tau_{sch}}{1 + \beta_i \tau_{sch}}$ $\alpha = k_1 (\rho_j - \rho_{su})$, $\beta_i = \alpha \exp(k_2 \cdot d_{F,ij})$, $\tau_{sch} = V_{esch} / Q_{sch}$		α = Schaumentwässerungsparameter (s^{-1}) β_i = Parameter des durch Schaumentwässerung verursachten Rückflusses der Feststoffteilchen (s^{-1}) τ_{sch} = mittlere Verweilzeit des Schaumes (s) ρ_j = Dichte des Feststoffs j (g/cm^3) und ρ_{su} = Trübedichte (g/cm^3) k_1, k_2 = Proportionalitätsparameter von α bzw. β_i ($cm^3/(g \cdot s)$) $d_{F,ij}$ = äquivalenter Durchmesser der Kugel gleicher stationärer Sinkgeschwindigkeit der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j (μm) V_{esch} = effektives Flüssigkeitsvolumen des Schaumes (cm^3) Q_{sch} = Volumenstrom des Schaumproduktes (cm^3/s)
e_{ij}	Trübemitführungsfaktor oder Trübemitführungsgrad der i-ten Teilchengrößenklasse des Minerals j	feine Teilchen $e_{ij} = \frac{R_{Tij}}{R_w}$	grobe o. breite Teilchengrößenklasse $e_{ij} = \frac{R_{Tij}}{R_w - R_{w0}}$	R_{Tij} , R_w = Feststoffausbringen durch Trübemitführung der i-ten Teilchengröße des Minerals j bzw. Wasserausbringen in der Flotationszeit t , bezogen auf die Aufgabetrübe (%) R_{w0} = minimales Wasserausbringen, ab dem das Feststoffausbringen durch Trübemitführung der i-ten Teilchengrößenklasse proportional zum Wasserausbringen ist (%)
X_{ij}	Stromklassierungsfaktor der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j	$X_{ij} = \frac{Q_{Tij}(0) \cdot C_{w,t}}{Q_w(0) \cdot C_{ij,t}}$		$Q_{Tij}(0)$, $Q_w(0)$ = Massestrom der i-ten Teilchengröße des Feststoffs j bzw. Massestrom des Wassers, der infolge der Trübemitführung die Trübe-Schaum-Grenze durchströmt (g/s) $C_{ij,t}$, $C_{w,t}$ = Konzentration der i-ten Teilchengröße des Feststoffs j bzw. Wassergehalt in der oberen Schicht der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone (g/cm^3)
P_i	Trübemitführungsfaktor der i-ten Teilchengröße des hydrophilen Minerals	$P_i = \frac{(Q_{w,A})^{0,7}}{(Q_{w,A})^{0,7} + b \psi(\eta)^{-0,5\psi} (m_i)^{(0,5\psi)^{-0,4}}}$		$Q_{w,A}$ = Wasserstrom ins Schaumprodukt, bezogen auf die Querschnittsfläche der Flotationszelle ($kg/(m^2/s)$) ψ = Teilchenformfaktor ; b = Konstante, $b = 0,00694$ η = scheinbare Trübeviskosität (mPa·s) m_i = Masse der i-ten Teilchengröße (pg)
ENT_{ij}	Trennkurve der i-ten Teilchengröße des Feststoffs j	$ENT_{ij} = \frac{2}{\exp[2,292 \cdot (d_i / d_{20})^a] + \exp[-2,292 \cdot (d_i / d_{20})^a]}$ $a = 1 - [\ln(1/\delta) / \exp(d_i / d_{20})]$		d_i = i-te Teilchengröße des Feststoffs j (μm) d_{20} = Trübemitführungsparameter, d.h. die Teilchengröße, bei der der Trübemitführungsfaktor 20 % ist (μm) δ = Schaumentwässerungsparameter

Tabelle 2.1b: Charakteristische experimentelle Werte für die unterschiedlichen Ansätze zur Bestimmung des Trübe mitführungsfaktors gemäß Tabelle 2.1a an ausgewählten Beispielen

Symbol	Charakteristische experimentelle Werte			Experimentelle Bedingungen	Literaturangabe
	Mineral	Größe (µm)	Werte		
CF_{ij}	kieselhaltige Gangart	<11	0,77 - 0,80	Sulfid-Flotation im industriellen Maßstab	[49, 50, 52, 116]
			0,51 - 0,83	Sulfid-Flotation im Pilotmaßstab, $\mu_{su} = 17\%$, $CF_{ij} = 0,51$; $\mu_{su} = 42\%$, $CF_{ij} = 0,83$	
			0,61 - 0,73	Sulfid-Flotation im Labormaßstab	
		75 ... 105	0,10 - 0,12	Sulfid-Flotation im industriellen Maßstab	
		75 ... 105	0,07 - 0,08	Sulfid-Flotation im Labormaßstab	
CR_{ij}	Steinkohle	<38	1,0	Kohle-Flotation im industriellen Maßstab	[50]
	Quarz	<38	s. Bild 2.4	Kleintechnische Flotationsanlage, geschlossener Kreislauf, nur Schlämmer als Reagens, Versuchsgut: Quarz, Fluorit, Hämatit, Scheelit, Cassiterit, ohne hydrophobe Teilchen	[51]
e_{ij}	Quarz	<5 32 ... 50	0,72 0,04	Diskontinuierliche Laborflotationsversuche mit Quarzkies und Siderit	[10]
	Quarz	<12 42 ... 74	0,80 0,55	Kleintechnische Flotationsanlage, geschlossener Kreislauf, gemischte Probe aus Quarz und Pyrit (hydrophob); nur mit Schlämmer	[53]
	Pyrit	<7 20,7 ... 26,6	0,89 0,73		
X_{ij}	Pyrithaltiges Sulfid-Erz	75 ... 150 <38	0,09 0,55	Laborflotationsversuche eines pyrithaltigen Sulfid- und Phosphat-Erzes	[38, 65, 71]
	Phosphat-Erz	75 ... 150 <38	<0,11 0,38 - 0,80		
P_i	Quarz	<45	0,17 - 0,72	Diskontinuierliche und kontinuierliche Laborflotationsversuche mit hydrophilen Teilchen	[22, 29, 30, 117]
	Chromit	<45	0,13 - 0,52		
	Phlogopit	<45	0,30 - 0,98		
ENT_{ij}	Silikat	45 ... 56 <7	0,03 - 0,21 0,80 - 0,91	Siehe oben bei CR_{ij}	[21, 113]

In industriellen Flotationsanlagen kann CF_{ij} durch die Bestimmung des Gehaltes und der Teilchengrößenverteilung der freien Gangartteilchen in den gleichzeitig entnommenen Proben aus dem Schaumprodukt und der Trübezone berechnet werden. CF_{ij} nimmt mit zunehmender Teilchengröße ab. CF_{ij} korreliert auch mit der Trübedichte sowie der Feststoffdichte (Tabelle 2.1b). *Laplante u. a.* [43] haben festgestellt, daß CF_{ij} bei der Laborflotation erheblich größer als bei dem industriellen Prozeß ist. Dies wird darauf zurückgeführt, daß die Verweilzeit des Schaumes in Laborflotationsapparaten kleiner als in industriellen Flotationszellen ist. Dies widerspricht allerdings den in der Tabelle 2.1b dargestellten Ergebnissen.

Bisshop und White [51] haben nachgewiesen, daß CF_{ij} von der Verweilzeit des Schaumes (τ_{sch}) sowie von der Schaumentwässerung (α) und dem durch Schaumentwässerung verursachten Rückfluß der Teilchen (β_i) in der Schaumzone abhängt (s. Bild 2.4). Deshalb wird der Stromklassierungsfaktor bezogen auf die mittlere Verweilzeit des Schaumes (τ_{sch}) vorgeschlagen (CR_{ij}). Die Ergebnisse zeigen ferner, daß die Verweilzeit des Schaumes ein wichtiger Parameter der Schaumentwässerung und somit des Ausbringens hydrophiler Teilchen durch Trübe mitführung ist.

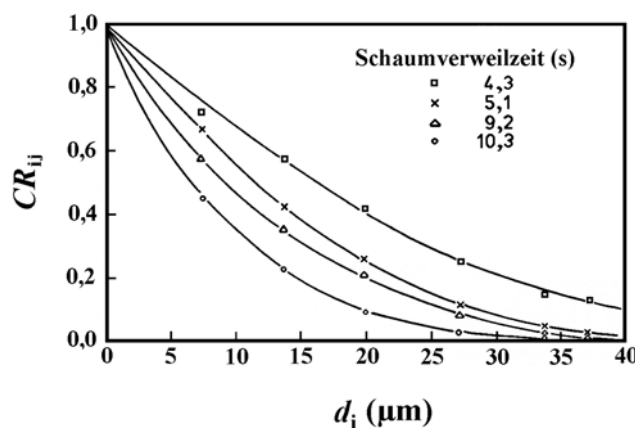


Bild 2.4: Einfluß der mittleren Schaumverweilzeit auf den Stromklassierungsfaktor des Quarzes [51]

Die Bestimmung des Stromklassierungsfaktors CR_{ij} ist nicht einfach, da die reale Verweilzeit des Schaumes in der Schaumzone durch eine Verteilungsfunktion besser als durch die mittlere Verweilzeit des Schaums ($\tau_{sch} = V_{lsch}/Q_{sch}$) beschrieben wird und abhängig von den Eintrittspositionen der Trübe in den Schaum ist. Außerdem ist die Messung des Volumens der Flüssigkeit im Schaum (V_{lsch}) und des Volumenstromes des Konzentrates (Q_{sch}) sowie die Bestimmung der Parameter α und β_i in industriellen Flotationszellen sehr schwierig. Darüber hinaus wurden diese Untersuchungen ohne Einbeziehung hydrophober Teilchen durchgeführt [51]. Somit ist die Wirkung dieser Teilchen auf die Schaumeigenschaften (Stabilität und Struktur) und die Trübe mitführung nicht berücksichtigt worden.

Der Trübe mitführungsfaktor oder Trübe mitführungsgrad e_{ij} ist das Verhältnis zwischen Feststoffausbringen der i -ten Teilchengrößenklasse durch Trübe mitführung und dem Wasserausbringen im Schaumprodukt. Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, daß die Abhängigkeit des Feststoffausbringens durch Trübe mitführung vom Wasserausbringen für feinste Teilchen linear ist. Für breite Teilchengrößenklassen oder Grobteilchen ist diese Abhängigkeit nur oberhalb eines bestimmten Wasserausbringens (R_{w0}) linear [10, 46, 53, 116]. Der Trübe mitführungsfaktor e_{ij} wird experimentell unter Laborflotationsbedingungen bestimmt. *Engelbrecht und Woodburn* [53] haben gezeigt, daß e_{ij} bei einem gegebenen Flotationsprozeß konstant bleibt, wenn das Feststoff- und das Wasserausbringen durch die Änderung der Schaumhöhe und des Luftdurchsatzes gesteuert und variiert werden und die anderen wesentlichen Parameter (Zusammensetzung und Teilchengrößenverteilung des Aufgabegutes, Feststoffmasseanteil in der Aufgabetrübe, scheinbare Viskosität der Trübe, Flotationszeit, Schaumabzugsrate, Rotordrehzahl) konstant bleiben. Aus den Ergebnissen von *Trahar* [10] geht hervor, daß e_{ij} der hydrophilen Teilchen (Quarz) durch die Modifizierung der Zusammensetzung der Aufgabetrübe mittels Zugabe hydrophober Teilchen (Chalkopyrit, Pyrrhotin) sowie durch die Änderungen der Trübedichte (16 bis 27 %) nicht beeinflusst wird. *Warren* [33] und *Ross* [35] haben bei diskontinuierlichen Laborflotationsversuchen festgestellt, daß e_{ij} über die Flotationszeit abnimmt. Ursache hierfür ist die allmähliche, aber schnellere Verminderung des zeitlichen Feststoffausbringens gegenüber dem Wasserausbringen im Verlauf des Flotationsversuches. Bei einem Vergleich haben *Smith und Warren* [42] nachwiesen, daß der Stromklassierungsfaktor CF_{ij} und der Trübe mitführungsfaktor e_{ij} identisch sind, wenn die Teilchen sehr fein und das Masseverhältnis von freien Gangartteilchen zu Wasser in der Flotationsaufgabe und in der Trübezone der Flotationszelle gleich sind.

Im Gegensatz zum Stromklassierungsfaktor CF_{ij} von *Johnson u. a.* [52] ist ein anderer Stromklassierungsfaktor X_{ij} von *Ross* [37, 38, 65, 71] vorgeschlagen worden. Dieser beschreibt und quantifiziert die „Stromklassierung“ der Teilchen in der Trübe-Schaum-Grenze, die durch Trübe mitführung in den Schaum ausgebracht werden. Er schließt die Änderung der Suspensionszusammensetzung in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone ($C_{ij,t}$, $C_{w,t}$) und des Schaumverhaltens ($Q_{Tij}(0)$, $Q_w(0)$) über der Flotationszeit mit ein. Jedoch wird die Änderung der Schaumstruktur mit zunehmender Schaumhöhe durch diesen Faktor nicht berücksichtigt. Der Massestrom der Teilchen durch Trübe mitführung $Q_{Tij}(0)$ und des Wassers $Q_w(0)$ in den Schaum werden unter besonderen vereinfachenden Annahmen bei einem Laborflotationsversuch berechnet: Bis zum Beginn des Schaumabzuges bleiben $Q_{Tij}(0)$ und $Q_w(0)$ konstant. Während der Durchführung eines Laborflotationsversuches wird zunächst ein Gleichgewichtsschaum gebildet.

Anschließend wird dieser Schaum durch eine besondere Vorrichtung entnommen und danach das Schaumprodukt abgezogen. Am Ende dieses Flotationsversuches mit Schaumabzug erfolgt das Feststoffausbringen ausschließlich durch Trübe mitführung [38, 65]. Zur Zeit kann der Stromklassierungsfaktor X_{ij} nur im Labormaßstab bestimmt werden [71]. Auf Grund der unterschiedlichen Hydrodynamik und damit des Suspensionszustandes in der Trübezzone der Flotationszellen verschiedener Größe ist die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf industrielle Anlagen zweifelhaft [37]. Der Stromklassierungsfaktor X_{ij} unterscheidet sich von dem Stromklassierungsfaktor CF_{ij} insofern, als CF_{ij} die „Stromklassierung“ der Teilchen in der gesamten Schaumzone beschreibt. Dagegen kennzeichnet X_{ij} lediglich die „Stromklassierung“ in der Trübe-Schaum-Grenze.

Kirjavainen [22, 31, 117] hat ebenfalls eine empirische Gleichung für den Trübe mitführungsfaktor P_i vorgeschlagen. Er stellte eine Abhängigkeit zwischen dem Trübe mitführungsfaktor (P_i) und der Masse und Form der Teilchen (m_i ; Ψ), der dynamischen Viskosität der Trübe mit *Newtonschem* Verhalten (η) sowie der Wasserausbringensrate pro Querschnittsfläche der Zelle ($Q_{w,A}$) fest. P_i ist der einzige Faktor, der die Wirkung der Teilchenform und die scheinbare Viskosität einschließt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen anderer Autoren [48, 49, 51, 70] ist P_i bei granularen Teilchenformen unabhängig von der Trübedichte. Bei plättchenförmigen Teilchen verringert sich P_i jedoch mit abnehmender Trübedichte. Die Bestimmung von P_i erfolgte durch Laborflotationsversuche hydrophiler Teilchen eines reinen Minerals unter Zusatz eines Schäumers. Dabei wurden die Wirkung der hydrophoben Teilchen auf das Schaumverhalten (z.B. Schaumstabilität und Schaumentwässerung) sowie das Ausbringen durch Trübe mitführung nicht berücksichtigt [22, 29 bis 31, 117, 119]. Aus der Gleichung für P_i (s. Tabelle 2.1) ist zu erkennen, daß die scheinbare Viskosität der Trübe für die Trübe mitführung der hydrophilen Teilchen wichtig ist. Dies gilt im besonderen bei konzentrierter Trübe (Feststoffmasseanteil >20 %) mit hohem Feinstteilchenanteil und/oder bei plättchenförmigen Teilchen (Phlogopit). In diesen Fällen tritt ein nicht-*Newtonsches* Verhalten der Trübe mit plastischem (*Binghamschen*) Charakter auf. Dies beeinträchtigt das Zurückfließen der Teilchen durch Schaumentwässerung. Die Trübe mitführung nimmt folglich zu.

Um das Verhältnis zwischen Teilchengröße (d_i) und Trübe mitführungsfaktor (ENT_{ij}) in mechanischen Flotationsapparaten darzustellen, haben *Savassi u.a.* [21] eine Trennkurve ENT_{ij} in Abhängigkeit vom empirischen Trübe mitführungsparameter d_{20} und Schaumentwässerungsparameter δ vorgeschlagen (s. Tabelle 2.1a und Bild 2.5). Trübe mitführungsparameter ist die Teilchengröße in μm , bei der der Trübe mitführungsfaktor 0,2 oder 20 % ist. Der Trübe mitführungsparameter ist als d_{20} bestimmt, weil er die Anpassung der

Trennkurve an experimentelle Werte im Bereich der Grobteilchen verbessert. Der Schaumentwässerungsparameter δ beschreibt den durch Schaumentwässerung verursachten bevorzugten Rückfluß der groben Teilchen und bestimmt die Form der Trennkurve. Eine Zunahme von δ bedeutet, daß sich der bevorzugte Rückfluß der Grobteilchen vergrößert. Die analytische Funktion für ENT_{ij} (s. Tabelle 2.1a und Bild 2.5) wurde durch Modifizierung einer hyperbolischen Sekansfunktion zur Erfüllung der folgenden Randbedingungen abgeleitet:

- $d_i \rightarrow \infty \Rightarrow ENT_{ij} \rightarrow 0$;
- $d_i = 0 \Rightarrow ENT_{ij} = 1$; und
- $d_i \rightarrow d_{20} \Rightarrow ENT_{ij} = 0,20$.

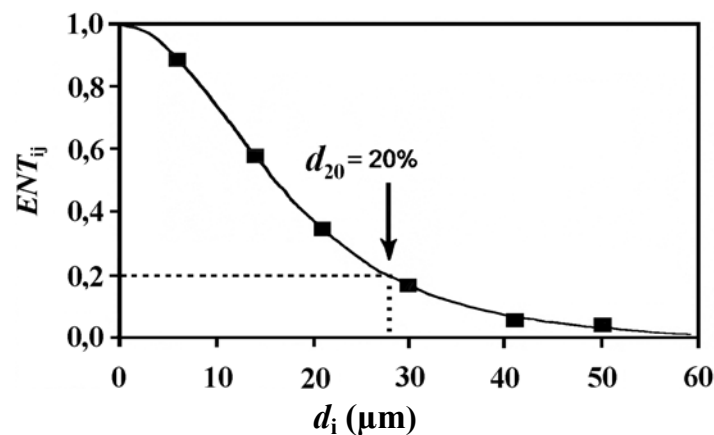


Bild 2.5: Darstellung der Trennkurve und der Bedeutung des Trübe mitführungsparameters d_{20} [113]

Die empirische Trennkurve beschreibt die Abhängigkeit der Trübe mitführung von Teilchengröße. Die individuelle Wirkung der anderen Einflußgrößen (z.B. Verweilzeit der Luft und der Teilchen im Schaum, Trübedichte, Schaumhöhe, usw.) ist in jedem Flotationssystem mit simultanem Ausbringen durch Heterokoagulation und Trübe mitführung mittels der Nutzung der freien Teilchen eines hydrophilen Gangartminerals als Tracer neu zu bestimmen. So können zusätzliche empirische Gleichungen für das Verhältnis zwischen diesen Einflußgrößen und den empirischen Parametern d_{20} und δ ermittelt werden. Durch die Anpassung dieser empirischen Gleichungen an experimentelle Werte kann der Trübe mitführungsfaktor der anderen Minerale bei gleichem Flotationssystem durch die Trennkurve ENT_{ij} bestimmt werden. Savassi u.a. [21] haben bei einer Anpassung der Trennkurve an experimentelle Werte von Bisshop und White [51] gefunden, daß d_{20} linear fallend von der Verweilzeit der Luft in der Schaumzone abhängt und δ zum Wasserausbringen umgekehrt proportional ist. Das heißt, mit zunehmender Verweilzeit der Luft im Schaum nimmt der Entwässerungsparameter δ zu und der Trübe mitführungsparameter d_{20} ab. Allerdings sind diese Zusammenhänge zwischen den

empirischen Parametern der Trennungskurve (d_{20} und δ) und den wichtigen Einflußgrößen der Trübeimführung vom Verhalten der Schaumstruktur des jeweils untersuchten Flotationssystems abhängig [21, 113].

Savassi u.a. [21] haben die typischen Verhältnisse zwischen Teilchengröße und Trübeimführungsfaktor (ENT_{ij}) für eine gegebene Mineraleichte dargestellt (s. Bild 2.6). Kurve A entspricht einem hohen Trübeimführungsfaktor mit dem durch Schaumentwässerung verursachten geringen Rückfluß der Grobteilchen. Kurve B resultiert aus einem mittleren Trübeimführungsfaktor mit dem durch Schaumentwässerung verursachten bevorzugten Rückfluß der Grobteilchen. Ein geringer Trübeimführungsfaktor mit dem durch Schaumentwässerung verursachten gering bevorzugten Rückfluß der Grobteilchen führt zum Kurvenverlauf C.

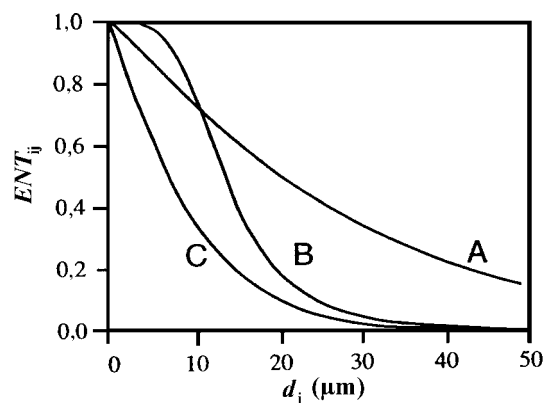


Bild 2.6: Typische Verhältnisse zwischen Teilchengröße (d_i) und Trübeimführungsfaktor (ENT_{ij}) für eine gegebene Mineraleichte [21]

Aus dieser Analyse der Trübeimführungsfaktoren wird ersichtlich, daß sie unter besonderen und oft idealen Bedingungen definiert wurden (Laborflotationszelle, Aufgabe aus ausschließlich hydrophilen Teilchen). Damit ist ihre Anwendbarkeit begrenzt. Sie können den Einfluß industrieller Flotationsschäume nur ungenügend bzw. nicht beschreiben.

Bis jetzt sind unterschiedliche Modelle zur Berechnung des Ausbringens durch Trübeimführung und Heterokoagulation auf der Basis der obengenannten Trübeimführungsfaktoren entwickelt worden. Diese sind in der Tabelle 2.2 zusammengefaßt.

2.1.1.2 Experimentelle Methoden zur Bestimmung des Ausbringens durch Trübeimführung und Heterokoagulation in mechanischen Flotationsapparaten

Um den Flotationsprozeß von Feinstteilchen zu verbessern, sollte man bei der Übertragung der Laborflotationsergebnisse in den industriellen Maßstab das Feststoffausbringen durch Heterokoagulation sowie durch Trübeimführung getrennt betrachten und gezielt spezifische Maßnahmen zum Optimieren der Ausbringensmechanismen festlegen.

Tabelle 2.2: Modelle zur Bestimmung des Ausbringens durch Trübenmitführung und Heterokoagulation auf der Basis der Trübenmitführungsfaktoren (Symbole s. Anlage 2)

Trübenmitführungsfaktor	Ausbringen durch Trübenmitführung	Ausbringen durch Heterokoagulation	Literaturangaben
CF_{ij}	$R_{Tij} = \frac{CF_{ij} \cdot R_w}{1 + R_w (CF_{ij} - 1)}$		[43]
	$Q_{Tij} = \frac{Q_w \cdot CF_{ij} \cdot m_{ij,t}}{m_{w,t}}$	$Q_{mij} = Q_{Hij} + Q_{Tij,f}$ $Q_{Tij,f} = T \cdot F_{ij} \cdot m_{m,f} + T' \cdot S_{ij} \cdot m_{s,t}$ $Q_{Hij} = k_f \cdot m_{f,t} + k_s \cdot m_{s,t}$ $T = Q_w \cdot CF_{ij} / m_{ij,t} ; T' = Q_w \cdot CF_i' / m_{w,t}$	[116]
CR_{ij}	$Q_{Tij} = Q_w \cdot C_{ij} \cdot CR_{ij}$	Gleiche Gleichung wie bei Literaturangabe [143], aber mit CR_{ij} statt CF_{ij}	[49, 50, 51]
e_{ij}	$R_{Tij} = e_{ij} \cdot R_w$	$R_{Hij} = R_{mij} - R_{Tij}$	[10, 33, 46, 53]
	$R_{Tij} = e_{ij} \cdot (R_w - R_{w0})$		[53]
X_j	$m_{Tj}(z) = m_{Tj}(0) \cdot \exp(-k_e \cdot z / V_B)$ $m_{Tj}(z) = (X_j m_w(0) \cdot \exp(-k_e \cdot z / V_B)) \cdot (C_{s,t} / C_{w,t})$ $m_{Tj}(t) = X_j \cdot m_w(t) \cdot (C_{s,t} / C_{w,t})$	$m_{Hj}(t) = m_{mj}(t) - m_{Tj}(t)$	[35, 36, 38, 71]
P_i	$R_i = 1 - \exp(-P_i \cdot R_w)$		[22]
ENT_{ij}	$R_{Tij} = ENT_{ij} \cdot R_w$	$R_{Hij} = 1 - e^{-k_{ij}t} ; k_{ij} = P_{ij} \cdot S_B \cdot R_{fij} ; R_{fij} = \exp(-\beta \tau_{sch})$	[21, 113, 118]

Wie im vorangegangenen Abschnitt ersichtlich wird, bestehen erhebliche Probleme bei der separaten Erfassung des Anteils von Heterokoagulation und Trübe mitführung am Gesamtausbringen [10, 21, 32, 35]. Eine getrennte direkte Erfassung des Feststoffausbringens durch Heterokoagulation in mechanischen Flotationsapparaten ist bis jetzt nicht möglich [32]. Das Ausbringen durch Trübe mitführung ist zwar individuell untersucht und erfaßt worden [10, 29 bis 32, 51], jedoch blieben dabei die Wirkung der hydrophoben Teilchen auf die Schaumeigenschaften (Struktur, Stabilität und Mobilität) und die Vorgänge im Schaum (z.B. Schaumentwässerung) und ihrer Rückwirkung auf die Trübe mitführung wenig beachtet. Bild 2.7 faßt die Vorgehensweisen zur direkten Bestimmung des Ausbringens durch Trübe mitführung und damit indirekten Berechnung des Ausbringens durch Heterokoagulation im Labormaßstab zusammen. Es werden typische Anwendungsgebiete sowie die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden beschrieben.

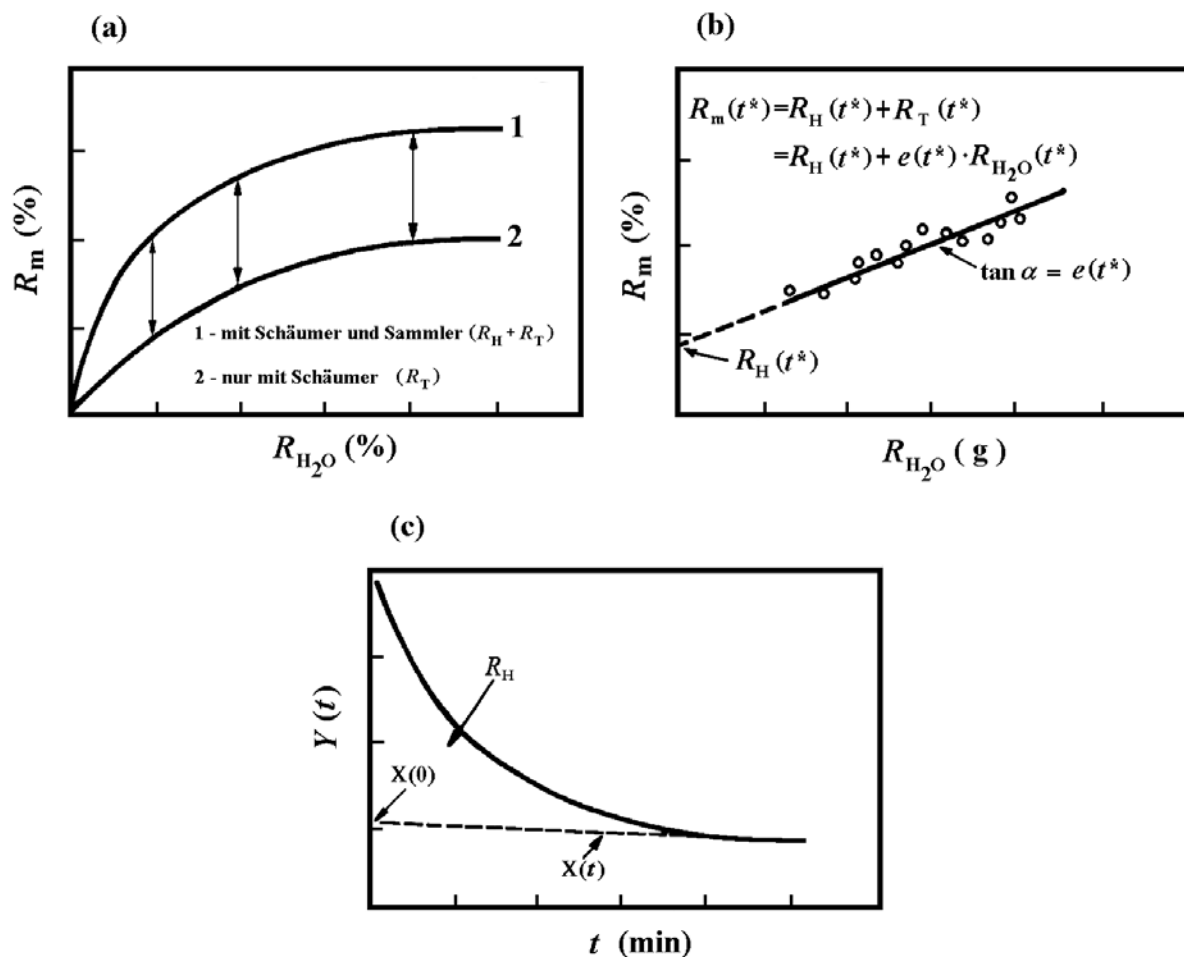


Bild 2.7: Schematische Darstellung der Methoden zur Bestimmung des Ausbringens durch die Heterokoagulation und die Trübe mitführung (nach Ross [35] mit eigenen Änderungen)

- a) Methode nach Trahar [10], b) Methode nach Warren [33] und c) Methode nach Ross [34-36, 38] - Erklärung der Symbole im Text

Methode nach Trahar

Bei dieser Methode (s. Bild 2.7a) werden das Feststoffausbringen (R_{mi}) für die i -te Teilchengrößenklasse der Aufgabe sowie das Wasserausbringen (R_{H_2O}) in zwei diskontinuierlichen Flotationsversuchsreihen bestimmt. Dabei wird in der ersten Versuchsreihe mit Schäumer und Sammler gearbeitet (Kurve 1). Bei der zweiten Serie der Experimente wird nur Schäumer zugegeben (Kurve 2). Es wird dabei angenommen, daß das Feststoffausbringen durch die Trübemitführung bei gleichem Wasserausbringen konstant bleibt. Wird nur Schäumer zugegeben (Kurve 2), soll das Feststoffausbringen ausschließlich durch Trübemitführung erfolgen. Dagegen wird vorausgesetzt, daß bei der anderen Versuchsserie (mit Schäumer und Sammler) das Ausbringen sowohl durch Heterokoagulation als auch durch Trübemitführung erfolgt. Das Feststoffausbringen durch Heterokoagulation wird dann aus der Differenz des Feststoffausbringens beider Versuchsreihen ermittelt.

Man sollte diese Methode nur nutzen, wenn der Schäumer keine Sammlerwirkung hat, die Teilchengröße der Aufgabe relativ groß ist und/oder die Oberfläche der Feststoffteilchen ohne Zugabe des Sammlers hydrophil ist. Die Anwendung dieser Methode ist auch deshalb beschränkt, weil ein Dreiphasenschaum durch die hydrophoben Teilchen wesentlich stabilisiert wird. Daraus resultieren erhebliche Konsequenzen auf Trübemitführung, Schaumentwässerung, Verweilzeit etc.

Die Anwendung dieser Methode ist nicht zu empfehlen, wenn die Wirkung der Schaumhöhe auf das Ausbringen durch Heterokoagulation untersucht werden soll oder die Flotationsaufgabe eine geringe Trübedichte besitzt, da der erzeugte Schaum bei der Versuchsserie nur mit Schäumer gering ist. Außerdem werden möglicherweise durch den Sammler die Charakteristiken des Schaumes (Stabilität, Struktur, Verweilzeit) beeinflusst. Dadurch könnten die Ausbringensraten des Wassers und der hydrophilen Teilchen durch die Trübemitführung ins Schaumprodukt sowie die Zusammensetzung der Trübe in der Schaumzone verändert werden.

Methode nach Warren

Bei dieser Methode (Bild 2.7b) wird eine Reihe von diskontinuierlichen Flotationsversuchen durchgeführt. Dabei werden die Flotationszeit (t^*) und das Reagensregime konstant gehalten. Variiert werden das Wasserausbringen $R_{H_2O}(t^*)$ und das Gesamtfeststoffausbringen $R_m(t^*)$ im Schaumprodukt durch Veränderung der Schaumabzugsrate und -tiefe sowie der Schaumhöhe. Wie Bild 2.7b veranschaulicht, werden der Anteil der Heterokoagulation $R_H(t^*)$, der durch Extrapolation des Kurvenverlaufes auf $R_m(t^*)$ bei $R_{H_2O}(t^*) = 0$ erhalten wird, und der Anteil der Trübemitführung $R_T(t^*)$, der proportional zum Wasserausbringen ($e(t^*) \cdot R_{H_2O}(t^*)$) erhöht wird, am Gesamtausbringen mittels linearer Regression indirekt ermittelt. Die nach Warren eingestellte

Flotationszeit t^* sollte so hoch sein, daß die Mehrheit der Feststoffteilchen mit guter Flotierbarkeit in das Schaumprodukt ausgetragen wird. Bei dieser Methode nimmt man an, daß der Trübemithführungsfaktor (e_{ij}) über die gesamte Flotationszeit konstant bleibt. Jedoch hat Ross [35] gezeigt, daß e_{ij} von der Flotationszeit (t) abhängig ist und mit zunehmender Dauer t abnimmt.

Diese Methode sollte man für fein- und feinstkörnige Suspensionen anwenden, da in diesen Fällen über die gesamte Flotationszeit eine gute Korrelation zwischen Feststoff- und Wasserausbringen besteht.

Nachteilig ist, daß diese Methode zeitaufwendiger als die anderen Verfahren ist. Außerdem kann die Anwendung der Änderung der Schaumhöhe zu Fehlern bei der Bestimmung des Betrages des Ausbringens durch Heterokoagulation führen, weil das Abreißen der Teilchen von den Teilchen-Blase-Aggregaten und die Blasenkoaleszenz im Schaum von der Schaumhöhe abhängig sind [36, 53]. Darüber hinaus beeinflußt die Änderung der Schaumabzugsrate und –tiefe möglicherweise das Ausbringen durch Trübemithführung [78, 79, 87, 88, 89].

Methode nach Ross

Bei dieser Methode (s. Bild 2.7c) wird in einem diskontinuierlichen Flotationsversuch der Anteil des Feststoffausbringens durch Heterokoagulation in der Flotationszeit t indirekt bestimmt. Dies erfolgt mit Hilfe des Übergangsfaktors der in der Flotationszeit t durch Trübemithführung ausgebrachten Teilchen $X(t)$ (Gl. 1) sowie des Übergangsfaktors der durch beide Mechanismen ausgebrachten Teilchen $Y(t)$ (Gl. 2).

$$X(t) = R_T(t) \cdot C_W(t) / \{R_{H_2O}(t) \cdot C_m(t)\} \quad (1)$$

$$Y(t) = R_m(t) \cdot C_W(t) / \{R_{H_2O}(t) \cdot C_m(t)\} \quad (2)$$

Daraus kann das Feststoffausbringen durch Trübemithführung $R_T(t)$ berechnet werden.

Das Feststoffausbringen durch Heterokoagulation $R_H(t)$ wird dann in Analogie zu Warren mit Hilfe der folgenden Gleichung (Gl. 3) berechnet:

$$R_H(t) = R_m(t) - R_T(t) \quad (3)$$

Das Gesamtfeststoffausbringen $R_m(t)$, das Wasserausbringen $R_{H_2O}(t)$ und die Konzentration des Feststoffs $C_m(t)$ sowie der Wassergehalt $C_W(t)$ in der Trübezzone werden experimentell bestimmt. Daraus wird der Übergangsfaktor $Y(t)$ in Abhängigkeit von der Flotationszeit ermittelt.

Um den Übergangsfaktor $X(t)$ zu berechnen, muß man die folgenden Annahmen treffen:

- das Feststoffausbringen am Ende des Flotationsversuches ($t \delta t_{\equiv}$) erfolgt ausschließlich mittels Trübemithführung; und

- der Übergangsfaktor $X(t)$ sinkt linear mit zunehmender Flotationszeit.

Daraus folgt:

$X(t_\infty) = Y(t_\infty)$, wenn $t \rightarrow t_\infty$, so daß $R_T(t) = R_m(t)$, und

$$X(t) = X(0) - bt \quad (4)$$

Dabei ist b der Anstieg der Geraden $X(t)$ und beschreibt den Einfluß der Änderung der Schaumeigenschaften auf das Zurückfließen der durch die Trübemitführung ausgebrachten Teilchen und des Wassers in der Trübe-Schaum-Grenze und der Schaumzone. Dadurch kann $X(t)$ für jede beliebige Flotationszeit aus der Kurve $Y(t)$ (s. Bild 2.7c) und damit ebenfalls $R_H(t)$ und $R_T(t)$ ermittelt werden.

Cilliers u.a. [67] entwickelten ein Modell zur Bewertung der Flotationskinetik im Labormaßstab (Steinkohle-Flotation), das auf dem freien Strom der Blasenoberfläche durch das Auslaufwehr und der Auswertung der Schaumstruktur der obersten Schaumzonenoberfläche mittels Bildanalyse und -verarbeitung und ihrer Abhängigkeit von den Vorgängen in der Schaumzone (Schaumentwässerung, Dicke der Schaumlamelle und hydraulische Grenzschicht der Blasen) basiert. Nach diesen Ergebnissen sind die oben erwähnten Annahmen korrekt.

Ross [36] hat durch Laborflotation von Pyrit gezeigt, daß die mittels dieser Methode bestimmten Pyritausbringen sehr gut mit Werten übereinstimmen, die mit Hilfe der Gleichung von *Klimpel* für eine Flotationskinetik erster Ordnung bei diskontinuierlicher Laborflotation berechnet wurden.

Vorteil der Methode ist, daß sie weniger zeitaufwendiger ist, da nur ein diskontinuierlicher Flotationsversuch erforderlich ist. Außerdem wird die über die Flotationszeit erfolgende Veränderung der Trübezusammensetzung und der Schaumcharakteristik berücksichtigt.

Diese Methode ist nicht anwendbar, wenn die Aufgabe aus groben Teilchen besteht. In diesem Fall wird das Ausbringen durch Heterokoagulation überbewertet. Das Verfahren sollte zudem nur bei guter Suspendierung der Feststoffteilchen in der Aufgabetrübe angewandt werden.

Vergleichende Untersuchungen zu den Methoden nach *Trahar*, *Warren* und *Ross* haben gezeigt, daß sich die ermittelten Beträge für das Ausbringen durch Heterokoagulation zum Teil stark voneinander unterscheiden und daß jede Methode ein eigenes und begrenztes Anwendungsfeld hat [34, 35]. Teilweise wird aber auch in vorstehender Beschreibung der Methoden sogar die Eignung der Methoden überhaupt angezweifelt.

Es wird anhand der Ausführungen deutlich, daß eine Weiterentwicklung der Methode zur Bestimmung des Ausbringens durch Trübemitführung und Heterokoagulation notwendig ist, um

die Beiträge dieser beiden Ausbringensmechanismen am Gesamtausbringen eines Flotationsprozesses genau und getrennt zu bestimmen.

2.1.2 Wichtige Einflußfaktoren auf die Trübe mitführung

Um die Trübe mitführung steuern bzw. reduzieren zu können, ist es erforderlich zu verstehen, welche Einflußgrößen die Trübe mitführung bestimmen und wie diese Einflußgrößen gesteuert werden können.

Aus den bisher veröffentlichten Untersuchungsergebnissen [4, 10, 19 bis 23, 33, 35, 36, 39 bis 44, 47 bis 54, 65 bis 70, 72, 78, 79, 86, 87, 91, 113 bis 123] geht hervor, daß die wesentlichen Einflußgrößen in ihrer Wirkung auf die Trübe mitführung direkt und individuell beurteilt worden sind. In wenigen dieser Arbeiten wurde die Trübe mitführung als Folge des Suspensionszustandes betrachtet. Aus der Sicht des Suspensionszustandes ist der Feststoffübergang von der Trübezone in den Schaum durch Trübe mitführung vom Trübevolumenstrom (Luftvolumenstrom, Blasenoberflächenstrom pro Querschnittsfläche der Zelle A_Q , S_B^3) und der Zusammensetzung der Trübe in diesem Volumenstrom abhängig. Deshalb spielen der Wassergehalt, die Luft- und Feststoffteilchenkonzentrationen sowie die Teilchengrößenverteilungen der Trübe und damit der Suspensionszustand direkt unterhalb der Schaumschicht eine entscheidende Rolle. Folgerichtig sind alle Einflußgrößen, die den Suspensionszustand und somit die Feststoffkonzentration und Teilchengrößenverteilungen in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone beeinflussen, auch für die Trübe mitführung bedeutsam. Dies sind:

- die Eigenschaften der Teilchen (Größe, Dichte, Form),
- die rheologischen Eigenschaften der Trübe (scheinbare Viskosität, Feststoffmasseanteil in der Trübe (Trübedichte), Temperatur, Dispergierzustand der Teilchen) und
- die Turbulenzintensität im oberen Trübevolumen (turbulenzerzeugende Systeme: Rotor-Stator-Strombrecher-System, Rotordrehzahl, Leistungseintrag und Beruhigungseinbauten; Geometrie des Prozeßraums; Luftvolumenstrom).

Aus den bisher veröffentlichten Ergebnissen zur Trübe mitführung feiner und feinsten Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten [4, 10, 19 bis 22, 31, 33, 35, 38 bis 54, 65, 67 bis 72, 79, 86, 87, 91, 113 bis 119, 123 bis 128] geht hervor, daß das Feststoffausbringen in das Schaumprodukt mittels Trübe mitführung grundsätzlich durch das Wasserausbringen und die wichtigsten Einflußgrößen, die aus der Betrachtung der Trübe mitführung als Folge des Suspensionszustandes oben abgeleitet sind, bestimmt wird.

Außerdem sind zum Übergang der Teilchen durch die Trübe mitführung von der Schaumzone ins

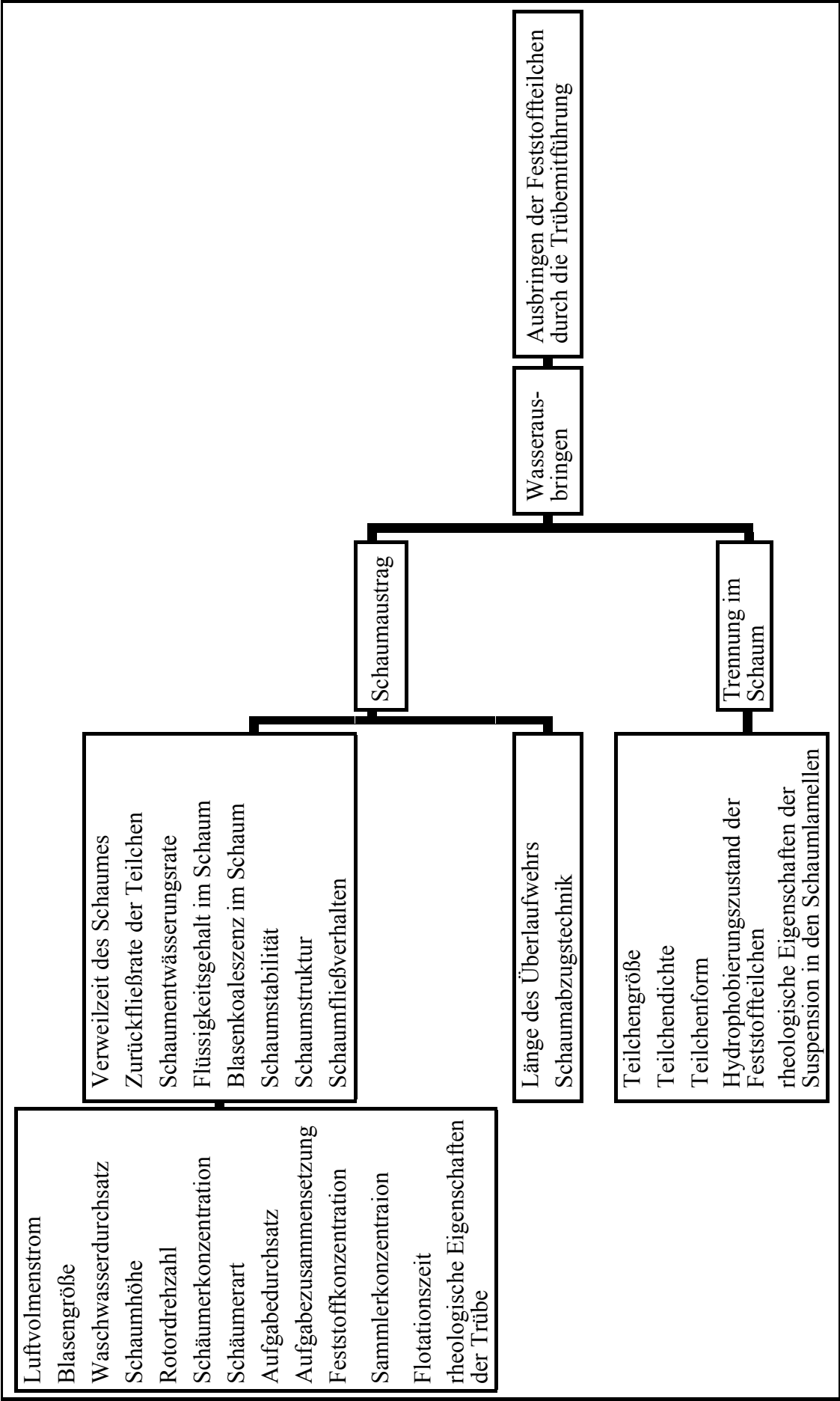
³ $S_B = 6 \cdot u_L / d_B$, u_L Luftleerrohrgeschwindigkeit (cm/s), d_B Blasendurchmesser (cm)

Schaumprodukt die Vorgänge im Schaum (Schaumentwässerung, Abreißen der Teilchen von den Teilchen-Blase-Aggregaten, Blasenkoaleszenz), die Schaumeigenschaften (Struktur: Übergang von Kugelschaum zum Polyederschaum (Dicke der Lamellen und Durchmesser der *Gibbs*-Kanäle), Stabilität und Fließverhalten) und Schaumparameter (Schaumhöhe, mittlere Schaumverweilzeit, Schaumabzugstechnik, Anwendung von Schaumberieselung durch Wasser) entscheidend.

2.1.2.1 Wasserausbringen

Das Ausbringen des Aufgabewassers ist die wichtigste Einflußgröße der Trübe mitführung, da die feinen und feinsten Teilchen auf Grund ihrer geringen Trägheit nahezu der Flüssigkeitsströmung folgen. Außerdem schließt das Wasserausbringen weitere wesentliche Einflußgrößen ein [129]. In Tabelle 2.3 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Die Variation dieser Einflußgrößen hat sowohl Auswirkungen auf das Wasserausbringen als auch auf das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung. Obwohl bereits die ersten Untersuchungen auf diesen Zusammenhang hinwiesen [52, 54, 101, 115], sind die bis heute entwickelten Modelle mangelhaft und jeweils nur für spezielle Fälle anwendbar. Beispiele dieser Modelle sind den Literaturangaben [20, 40, 118, 126] zu entnehmen. Um ein allgemeines, übertragbares Modell zu entwickeln, müssen weitere Untersuchungen zum Einfluß der wesentlichen Einflußgrößen (s. Tabelle 2.3) auf das Wasserausbringen durchgeführten werden. Die Mehrzahl der Untersuchungen [10, 29, 31, 33, 35, 40, 41, 43, 44, 47, 50, 53, 74, 116, 119] hat ergeben, daß bei feinsten Teilchen (<5 bis $15\mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Dichte) zwischen dem Feststoffausbringen durch Trübe mitführung und dem Wasserausbringen eine lineare Abhängigkeit besteht. Bei größeren Teilchen und einer breiteren Teilchengrößenklasse ergibt sich ein nicht linearer Zusammenhang [35, 43, 47, 50, 53, 108, 116]. Oberhalb eines minimalen Wasserausbringens führt hier jedoch eine Gerade zur besten Anpassung der experimentellen Meßwerte, wie bereits im Abschnitt 2.1.1.1. erwähnt wurde. Die Abweichung vom linearen Zusammenhang wird unterschiedlich begründet [42, 47]. *Smith und Warren* [42] erklären dies mit der Abhängigkeit des Trübe mitführungsfaktors e_{ij} von der Teilchengröße bzw. Teilchengrößenklasse. Deshalb soll bei einer breiten Teilchengrößenverteilung eine Parabel die beste Beschreibung darstellen. *Thorne u.a.* [49] führen die Abweichung ebenfalls auf die Teilchengröße zurück, wobei im Fall der Feinstteilchen niedrigere Trägheit und geringere Sinkgeschwindigkeit anzutreffen sind. Die Sinkgeschwindigkeit der Feststoffteilchen nimmt mit der Teilchengröße zu und die Geschwindigkeit der Schaumentwässerung bleibt nahezu konstant. Deshalb ist die Beziehung zwischen Feststoff- und Wasserausbringen bei feinen Teilchen linear und bei Grobteilchen oder breiter Teilchengrößenklasse nicht linear.

Tabelle 2.3: Wichtigere Einflußgrößen für das Wasserausbringen und das Ausbringen der Feststoffteilchen durch die Trübe mitführung in der Schaumzone und dem Schaumprodukt (nach Kaya u.a. [129] mit eigenen Ergänzungen)



2.1.2.2 Teilcheneigenschaften

Untersuchungen zum Ausbringen durch Trübe mitführung haben ferner gezeigt, daß das Feststoffausbringen stark von der Teilchenmasse (Größe und Dichte) sowie Teilchenform abhängt. Wie schon in Abschnitt 2.1.1.1 erwähnt, nimmt das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung ins Schaumprodukt mit zunehmender Teilchengröße und Teilchendichte ab. Dies kann durch den turbulenten Transport der Teilchen in der Trübezone und somit den Suspensionszustand sowie das Bewegungsverhalten der Teilchen in der Schaumzone erklärt werden [1, 21, 42, 52, 54, 68, 91]. Feine und feinste Feststoffteilchen sind mehr oder weniger homogen suspendiert und folgen zunächst dem Fluidstrom von der Trübezone in die Schaumzone. Danach werden sie durch die Auftriebkraft der Teilchen-Blase-Aggregate und gegen den durch Schaumentwässerung verursachten Rückflußstrom in das Schaumprodukt ausgetragen. Demgegenüber fließen die Grobteilchen aufgrund der Schwerkraft (Sinkgeschwindigkeit) und des durch die Schaumentwässerung verursachten Rückflußstromes von der Schaumzone in die Trübezone zurück, oder sie werden schon in der Trübe-Schaum-Grenze zurückgehalten [1, 10, 21, 22, 30, 33, 42, 43, 47, 49 bis 54, 68, 125]. Die simultane Wirkung dieser verschiedenen Mechanismen in Abhängigkeit von der Teilchengröße kann sowohl den linearen Zusammenhang zwischen dem Feststoffausbringen durch Trübe mitführung und dem Wasserausbringen bei feinen und feinsten Teilchen als auch den nicht linearen Kurvenverlauf bei Grobteilchen und einer breiten Teilchengrößenverteilung erklären.

Bei gleicher Größe und Dichte haben die plättchenförmigen Teilchen eine geringere Sinkgeschwindigkeit als die körnigen Partikeln. Dies trifft aber nur zu, wenn sich die plättchenförmigen Teilchen quer zur Bewegungsrichtung einordnen (d. h. bei höheren *Re*-Zahlen). Wegen der dort auftretenden sterischen Behinderung ist ihr Zurückfließen beschränkt. Deswegen ist das Ausbringen von plättchenförmigen Teilchen durch Trübe mitführung größer als das der körnigen Teilchen. Außerdem wird bei den plättchenförmigen Teilchen das Ausbringen durch Trübe mitführung von dem Feststoffmasseanteil in der Trübe (Trübedichte) und der scheinbaren Viskosität der Trübe stärker beeinflusst. *Kirjavainen und Mitarbeiter* [22, 29 bis 31, 117] erklären das besondere Verhalten der plättchenförmigen gegenüber den körnigen Teilchen mit ihrem erschwerten Zurückfließen vom Schaum zur Trübezone infolge der Erhöhung der scheinbaren Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen. Diese Autoren haben z. B. für konstante Flotationsbedingungen in einem Laborflotationsapparat und für Teilchengrößenklassen $<45\ \mu\text{m}$ festgestellt, daß das Ausbringen des plättchenförmigen Phlogopits durch Trübe mitführung größer als das des körnigen Quarzes und Chromites war. Dies haben auch *Hamunanth und Williams* [39] durch Untersuchung zum Einfluß der Schaumhöhe auf die Trübe mitführung des

Quarzes (körnige Teilchen) und Glimmer (plättchenförmige Teilchen) bei einer Kaolin-Flotation im Laborflotationsapparat nachgewiesen.

2.1.2.3 Zusammensetzung der Aufgabetrübe

Die bisher veröffentlichten Ergebnisse zum Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabe auf das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung sind widersprüchlich.

Trahar [10] fand bei diskontinuierlichen Laborflotationsversuchen mit synthetischen Mischungen von Quarz und Chalkopyrit bei unterschiedlicher Schäumerdosierung (2,5 – 10 mg/min) den gleichen Wert für das Ausbringen durch Trübe mitführung des Quarzes, unabhängig davon, ob gut flotierbarer Chalkopyrit zugegeben wurde oder nicht. Die Ergebnisse von *Subrahmanyam und Forssberg* [46] zur Trübe mitführung des Quarzes stimmen bei der Flotation eines Kupfererzes in einer Laborflotationszelle mit den Ergebnissen von *Trahar* [10] überein. In beiden Arbeiten wurde die Methode nach *Trahar* (s. Abschnitt 2.1.1.2) zur Bestimmung des Beitrags der Trübe mitführung und der Heterokoagulation am Gesamtausbringen benutzt.

Im Gegensatz dazu hat *Ross* [36] bei Laboruntersuchungen zur Erhöhung des Anteils der hydrophoben Gangart in der Flotationsaufgabe (Pyrit-Erz) festgestellt, daß sich der Trübe mitführungsfaktor („Stromklassierungsfaktor“ X_{ij}) mit steigendem Feststoffmasseanteil der hydrophoben Teilchen in der Aufgabetrübe vergrößert. Dieses Ergebnis wurde durch die Erhöhung der Stabilität und Mobilität des Schaumes infolge des zunehmenden Feststoffmasseanteils der hydrophoben Teilchen erklärt.

Gülsoy u.a. [20] haben bei Untersuchungen zur Wirkung einiger Einflußgrößen auf das Wasserausbringen in einer Laborflotationszelle mit synthetischen Mischungen von Pyrit/Quarz, Magnetit/Quarz sowie nur Pyrit als Versuchsgut gezeigt, daß das Wasserausbringen mit steigendem Anteil des hydrophoben Minerals in der Aufgabetrübe (5 bis 20 %) zunimmt. Daraus kann man ableiten, daß sich das Quarzausbringen durch Trübe mitführung mit steigendem Anteil hydrophober Teilchen in der Aufgabetrübe (5 bis 20 %) ebenfalls vergrößert.

Szatkowski [68] hat bei der Steinkohleflotation in Laborflotationsapparaten festgestellt, daß sich bei Erhöhung des Anteils hydrophiler Teilchen (Asche) in der Flotationsaufgabe ein Schaumprodukt mit geringem Aschegehalt einstellt. Er begründet dies mit der gleichzeitigen Erhöhung der Blasenkoaleszenz infolge der geringeren Bedeckung der Blasenoberflächen.

Ata und Ahmed [19] stellten dagegen bei einer Laborflotation synthetischer Mischungen mit Quarz ($\mu_{\text{SiO}_2} = 10 \%$) eine Verminderung des Trübe mitführungsfaktors CF_{ij} bei zunehmendem Masseanteil der hydrophoben Teilchen (Graphit; $\mu_{\text{Graphit}} = 0,5 \text{ bis } 2,0 \%$) fest.

Diese Ergebniszusammenstellung veranschaulicht, daß weitere Untersuchungen erforderlich

sind, um die Wirkung der Zusammensetzung der Aufgabetrübe auf die Trübe mitführung all-gemeingültig zu erklären.

2.1.2.4 Feststoffmasseanteil in der Trübe

Im allgemeinen haben die Untersuchungen zum Einfluß des Feststoffmasseanteils in der Trübe (Trübedichte) auf das Ausbringen durch Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten gezeigt, daß das Feststoffausbringen mit zunehmendem Feststoffmasseanteil in der Trübe zunimmt [49 bis 52, 54, 116, 130]. Im Gegensatz dazu stehen die bereits erwähnten Ergebnisse von *Trahar* [10] und *Kirjavainen und Mitarbeiter* [29 bis 31, 119]. Nach *Trahar* [10] bleibt der Trübe mitführungsfaktor bei Variation des Feststoffmasseanteils in der Trübe von 16 % bis 27 % des Quarzes $< 5 \mu\text{m}$ konstant. *Kirjavainen und Mitarbeiter* [29 bis 31, 119] haben gezeigt, daß der Trübe mitführungsfaktor P_i der körnigen hydrophilen Quarz- und Chromitteilchen ($< 45 \mu\text{m}$) vom Feststoffmasseanteil in der Trübe ($< 20 \%$) unabhängig ist. Bei plättchenförmigen hydrophilen Teilchen (Phlogopit) war P_i jedoch vom Trübefeststoffgehalt abhängig.

Die Trübe verdünnung wird bei der industriellen Reinigungsflotation genutzt, um die Trübe mitführung zu reduzieren [22, 42, 52, 50, 129]. Diese Maßnahme hat den Nachteil, daß bei einer gegebenen Feststoffmenge in der Flotationsaufgabe mehr Trübe volumen zu flotieren ist. Dadurch wird ein größeres Durchsatzvermögen der Flotationsanlage benötigt.

2.1.2.5 Schaumentwässerung, -höhe und -verweilzeit

Untersuchungen über die Struktur von Flotationsschäumen haben gezeigt, daß der Wasservolumenanteil mit zunehmender Schaumhöhe abnimmt [39, 69, 78, 87, 126]. Das ist mit der durch die Schwerkraft verursachten Schaumentwässerung zu begründen. So verringerte sich der Wasservolumenanteil bei der Reinigungsflotation in einer Pilotanlage [64] von 0,8 bis 0,6 in der Trübe-Schaum-Grenze auf 0,1 in Höhe des Schaumabzugs. Die Schaumentwässerung wirkt somit auf das Wasserausbringen in das Schaumprodukt und damit der Trübe mitführung entgegen. Infolgedessen hängen Wasser- und Feststoffausbringen durch Trübe mitführung in das Schaumprodukt stark von der Schaumhöhe (H_{sch}) und der mittleren Verweilzeit des Schaumes (τ_{sch}) ab. Die zahlreichen Untersuchungen weisen diese Abhängigkeit ebenfalls nach [39, 35, 49, 51, 53, 69, 79, 108, 116]. Die mittlere Verweilzeit des Schaumes ist neben der Schaumhöhe auch von der Luftleerohrgeschwindigkeit (u_L) ($\tau_{\text{sch}} = H_{\text{sch}}/u_L$) abhängig [21, 39, 51, 68]. *Bisshop und White* [51] haben bei Untersuchungen zur Wirkung des durch die Schaumentwässerung verursachten Rückflusses der Feststoffteilchen auf das Ausbringen der hydrophilen Teilchen in einer kleintechnischen Flotationsanlage herausgefunden, daß die

mittlere Verweilzeit des Schaumes eine wichtige Einflußgröße für den Rückfluß der hydrophilen Teilchen und ihr Ausbringen in das Schaumprodukt ist. Bild 2.4 im Abschnitt 2.1.1.1 zeigt, daß sich der Stromklassierungsfaktor CR_i des Quarzes mit steigender mittlerer Schaumverweilzeit reduziert. Folglich kann das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung durch die Steuerung der Einflußgrößen, welche die mittlere Schaumverweilzeit beeinflussen, reduziert werden. Das sind z. B. die Schaumhöhe, der Luftvolumenstrom, die Schaumabzugsrate und die Schaumberieselung durch einen Waschwasserstrom. Durch die Vergrößerung der Schaumhöhe (bei einem konstanten Luftvolumenstrom) kann die Verweilzeit des Schaums vergrößert werden. Dadurch kann das Zurückfließen der Feststoffteilchen, die in der Trübe der Schaumlamellen suspendiert sind, verstärkt werden. Daraus resultieren beim Abzug der obersten dünnen Schicht der Schaumzone ein geringeres Wasser- und Feststoffausbringen durch Trübe mitführung [1, 116]. Gleichzeitig vermindern sich in diesem Schaumbereich auch die Dicke der Schaumlamellen sowie der Durchmesser der *Gibbs*-Kanäle. Dadurch werden Teilchen, die durch Trübe mitführung in den Schaum ausgetragen wurden und größer als die Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle sind, in ihrer Bewegung behindert (sterische Behinderung). Sie werden als Einschließung in das Schaumprodukt ausgetragen. Das führt zur Erhöhung des hydrophilen Teilchengehaltes im Schaumprodukt bei zunehmender Schaumhöhe. *Ross* [34, 36, 65, 125] wies dies für die Flotation von Pyrit- und Phosphat-Erz nach. *Szatkowski* [68] bestätigte dies für die Steinkohle-Flotation im Labormaßstab. Die Mehrheit der experimentellen Arbeiten führen jedoch zu der Erkenntnis, daß das Wasser- und das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung mit zunehmender Schaumhöhe abnehmen [19, 21, 39, 49, 51, 53, 69, 78, 116]. Dabei nimmt das Feststoffausbringen durch Heterokoagulation wegen der Blasenkoaleszenz und somit das Zurückfließen der abgerissenen hydrophoben Teilchen von Blasen weniger intensiv ab. Deshalb kann die Vergrößerung der Schaumhöhe nur bedingt bei geringem Wertstoffausbringungsverlust genutzt werden, um die Trübe mitführung zu reduzieren. Diese Maßnahme wird in industriellen Flotationsanlagen in Nordamerika und Australien angewandt [46, 50, 116].

2.1.2.6 Schaumeigenschaften und weitere Vorgänge in der Schaumzone

Die Vorgänge im Schaum und die Schaumeigenschaften bestimmen u.a. auch die Trennschärfe und den Flotationserfolg. Im allgemeinen führen sie zu einer sekundären Anreicherung im Flotationsschaum gegenüber der Zusammensetzung des Dreiphasenschaumes, der direkt in der Trübe-Schaum-Grenze gebildet wird [1, 35, 37, 41, 68, 71, 112, 130]. Der Umfang der sekundären Anreicherung und damit ihre Wirkung auf die Trübe mitführung der hydrophilen Teilchen in die Schaumzone sind von der Stabilität, Struktur, Mobilität und der mittleren

Verweilzeit des Schaumes, von der Schaumentwässerung, der Dicke der Schaumlamellen, der Schaumabzugstechnik sowie der Schaumberieselung durch Waschwasser abhängig [37, 39, 51, 65, 68, 70, 71, 72, 78, 79, 87 bis 89, 121, 124, 125, 131, 132]. Für eine gute sekundäre Anreicherung in der Schaumzone sind normalerweise genügend lange Schaumverweilzeiten und eine optimale Schaumhöhe erforderlich. Außerdem müssen der Raum zwischen den beladenen Kugeln im Kugelschaum und die Lamellen und *Gibbs*-Kanäle im Lamellenstrukturschaum breiter als die maximale Teilchengröße der durch Trübe mitführung in den Schaum ausgebrachten Teilchen sein [1]. Die Wirkung der Schaumentwässerung, der Schaumhöhe und der mittleren Schaumverweilzeit wurde bereits diskutiert. Die Wirkung der Schaumberieselung durch Waschwasser wird im nächsten Abschnitt zusammengefaßt.

Die Flotationsschäume entstehen durch das Aufsteigen der Schwärme von mehr oder weniger beladenen Blasen zur Trübe-Schaum-Grenze. An der Unterseite der Schaumschicht bildet sich ein beladener Kugelschaum, der beim weiteren Aufstieg in den Lamellenstrukturschaum übergeht (s. Seite 6). Generell sind Flotationsschäume im Vergleich zu den ihnen entsprechenden Zweiphasenschäumen stabiler [4, 133]. Ein Grund dafür ist die Verminderung der Schaumentwässerung wegen der Verengung des Wasserweges durch die Anwesenheit der haftenden und nicht haftenden Feststoffteilchen in Lamellen und *Gibbs*-Kanälen und durch die Erhöhung der Rauigkeit der beladenen Blasenwände. Damit werden die Verdünnung der Lamellen und die Zerstörung des Schaumes verhindert [4, 134]. Die Schaumstabilität spielt eine wichtige Rolle für die Trübe mitführung, weil das Zurückfließen der durch Trübe mitführung in den Schaum ausgetragenen Feststoffteilchen beeinflußt wird. Sie hängt grundsätzlich von den Eigenschaften (Form, Größe und Hydrophobierungszustand), der Menge und dem Dispersionszustand der Feststoffteilchen sowie dem Mengenverhältnis hydrophober und hydrophiler Teilchen, der scheinbaren Viskosität des Schaumes und den Flotationsreagenzien (Schäumer, Sammler und anorganische Elektrolyte) ab [4, 39, 47, 75, 86, 126, 133 bis 144]. Instabile Flotationsschäume sind durch das Zerplatzen der beladenen Blasen vor ihrem Abzug durch das Auslaufwehr der Flotationszelle gekennzeichnet und führen zu einer Verminderung des Wertstoffausbringens. Sehr stabile Schäume halten einen großen Anteil der durch Trübe mitführung in den Schaum ausgebrachten Feststoffteilchen zurück. Folglich wird die Qualität des Konzentrates vermindert. Ein geeigneter Flotationsschaum liegt zwischen diesen beiden Extremfällen vor. Prinzipiell bewirken plättchenförmige Feststoffteilchen eine höhere Schaumstabilität als körnige Teilchen [4, 137]. Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen zum Einfluß der Hydrophobie geht hervor, daß mäßig hydrophobierte Teilchen (Randwinkel $\theta < 40^\circ$) die Schaumstabilität kaum beeinflussen, während solche mit mittlerer Hydrophobierung (θ um 60°) deutlich stabilisierend, stark

hydrophobierte ($\theta > 80^\circ$) aber destabilisierend auf die Flotationsschäume wirken [65, 135 bis 138]. Das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung ist bei stabilem Schaum, bei hohem Wasservolumenanteil und sehr kleinen, eng gepackten Blasen größer als bei nicht stabilem Schaum mit geringem Wasservolumenanteil und locker gepackten Grobblasen [19, 47, 71, 111]. *Woodburn u.a.* [73] haben für die Steinkohleflotation diese Beziehung zwischen Schaumstabilität, Blasengröße und Trübe mitführung experimentell nachgewiesen. Im allgemeinen führen feine, hydrophile, plättchenförmige Teilchen zu einem stabileren Schaum [13, 135 bis 138, 145]. Somit wird ihre Trübe mitführung vergrößert.

Moys [88, 89] hat aus der Analyse der experimentellen Werte der Flotation eines komplexen Sulfid-Erzes mit silikatischen Gangartmineralen im Labormaßstab durch sein Modell zum Massetransport im Flotationsschaum festgestellt, daß Schaum mit hoher Stabilität kleine Verweilzeiten hat. Damit wird das Feststoffausbringen durch die Trübe mitführung ins Schaumprodukt erhöht. Außerdem konstatierte er, daß die Schaumstabilität durch die Änderungen des Luftvolumenstromes (ein starker Luftvolumenstrom führt zu instabilerem Schaum), der Schaumhöhe sowie des Typs und der Dosierung des Schäumers gesteuert werden kann. Die Schaumstabilität wird hier durch den Schaumstabilitätsparameter charakterisiert. Unter diesem Parameter versteht man das Verhältnis zwischen dem Luftvolumenstrom im Schaumprodukt und dem Luftvolumenstrom in Form der Blasen, die durch die Trübe-Schaum-Grenze übergehen und deren Eintrittswahrscheinlichkeit in den Schaumproduktstrom größer null ist. *Ross* [65], *Goodal u.a.* [69] und *Moudgil* [126] haben bei Laborflotationsversuchen von Pyrit-Erz, synthetischen Mischungen von Pyrit und Quarz und Phosphat-Erz festgestellt, daß das Ausbringen der hydrophilen Teilchen durch die Trübe mitführung mit steigender scheinbarer Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen zunimmt, weil das Zurückfließen dieser Teilchen reduziert und das Fließverhalten des Schaumes verschlechtert wird.

Viele Autoren [37, 65, 68, 72, 79, 124, 125, 132] haben die Abhängigkeit des Ausbringens der feinen und feinsten Teilchen von der Dicke der Schaumlamellen in mechanischen Laborflotationsapparaten untersucht. *Flynn* und *Woodburn* [79, 124] konstatieren, daß die Trübe mitführung der feinen Teilchen durch die Dicke der Schaumlamellen und die Feststoffkonzentration der Trübe in den Schaumlamellen bestimmt wird. Sie haben nachgewiesen, daß die Dicke der Lamellen des Dreiphasenschaumes im Vergleich zum Zweiphasenschaum größer ist. Die Grenzdicke der Schaumlamellen, d. h. die minimale Dicke der Schaumlamelle, unten der die Lamelle durch die Wirkung der hydrophoben Teilchen zerreißt, wird in einem gut entwässerten Schaum von d_{95} der Teilchengrößenverteilung des Aufgabegutes bestimmt. Nach *Flynn* und *Woodburn* [79, 124] bilden die groben Teilchen bei der Grenzdicke der Schaumlamelle

eine Brücke zwischen den Blasenwänden, die das Zurückfließen der Teilchen in der Trübe, die sich in den Schaumlamellen befindet, durch Einschließung vermindert. Dadurch nimmt die Trübe mitführung zu. Die gleiche Modellvorstellung hat *Ross* [37, 65, 125] im Fall der Reinigungsflotation von Pyrit-Erz benutzt, um die Erhöhung des Feststoffausbringens durch Trübe mitführung bei Zunahme der Schaumhöhe und des Verhältnisses zwischen Feststoff und Wasser im Schaumprodukt zu erklären.

Moys [78, 88, 89] und *Cutting* [87] schließen aus ihren experimentellen Ergebnissen zur Labor-, Pilot- und Betriebsflotation, daß die Schaumabzugstechnik eine wichtige Rolle für den Flotationserfolg spielt. Sie ist sowohl von der Auslegung als auch von der Geometrie der „Schaumkammer“ abhängig. Eine optimale Schaumabzugstechnik muß somit folgende Bedingungen erfüllen:

- Sie muß eine maximale Schaumentwässerung ermöglichen.
- Gleichzeitig soll sie die Zerstörung des resultierenden instabilen Schaumes gering halten.
- Die Auslegung der Schaumkammer muß den Querstrom des Schaumes in horizontaler Richtung vermindern können, um den Senkrechttransport des Schaumes ins Schaumprodukt zu maximieren. Die durch das horizontale Fließen des Schaumes verursachte Scherebene sowie Blasenkoaleszenz ist zu verringern und damit die daraus resultierende Reduzierung des Feststoffausbringens zu minimieren.
- Die Bildung von Toträumen ist zu verhindern.
- Außerdem muß die Möglichkeit der Schaumberieselung durch Waschwasser gegeben sein, um das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen durch die Schaumentwässerung zu verstärken.

2.1.2.7 Luftvolumenstrom

Der Einfluß des Luftvolumenstromes auf das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung ist sehr komplex. Er wirkt sowohl auf den Wasservolumenanteil, den Blasendurchmesser, die Verweilzeit des Schaumes und die Schaumentwässerung bei einer gegebenen Schaumhöhe als auch auf die Höhe des erzeugten stabilen Schaumes. Mit Erhöhung des Luftvolumenstromes werden der Wasservolumenanteil bei einer festgelegten Schaumhöhe, die mittlere Blasengröße, die Höhe des erzeugten stabilen Schaumes und die mittlere Geschwindigkeitskonstante der zurückfließenden Feststoffteilchen erhöht. Gleichzeitig sinken die mittlere Verweilzeit des Schaumes ($\tau_{sch} = H_{sch}/u_L$) und die Geschwindigkeitskonstante der Schaumentwässerung [65, 71]. Geschwindigkeitskonstanten der Schaumentwässerung (k_w) und der zurückfließenden Feststoffteilchen (k_s) werden von *Ross* [71, 146] benutzt, um die Abwärtsstromgeschwindigkeiten eines Teils des Wassers bzw. der Feststoffteilchen der Trübe, die durch die Trübe mit-

führung in den Schaum gelangt ist, zu beschreiben. Zur experimentellen Bestimmung von k_w und k_s hat Ross [71, 146] angenommen, daß die Kinetik der Schaumentwässerung und der zurückfließenden Feststoffteilchen in Abhängigkeit von der Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze z einem Prozeß 1. Ordnung entspricht. Die abgeleiteten Modellgleichungen sind in der Literatur angegeben [71, 146]. Diese Geschwindigkeitskonstanten sind auch durch den Abstand zwischen den Wänden beladener Blasen bei dem beladenen Kugelschaum und die Dicke der Lamellen sowie der *Gibbs*-Kanäle bei dem Lamellenstrukturschaum bestimmt. Außerdem sind diese geometrischen Größen (Abstand und Dicke) von der Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze und von dem Luftvolumenstrom abhängig. Bild 2.8 und 2.9 zeigen den Einfluß des Luftvolumenstromes auf die Geschwindigkeitskonstante der Schaumentwässerung bzw. der zurückfließenden Teilchengrößenklasse (75 ... 150 μm) von Pyrit-Erz, die durch Trübe mitführung erfaßt wird, in einem Laborflotationsapparat.

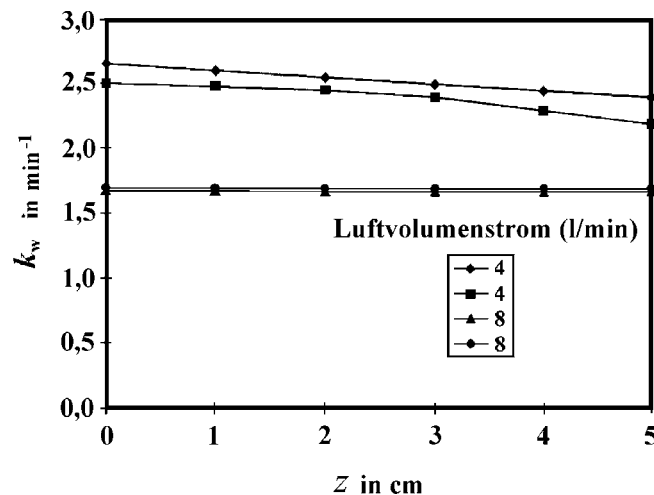


Bild 2.8: Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten der Schaumentwässerung (k_w) von der Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze (z) bei einer Laborflotation von Pyrit-Erz (75 ... 150 μm); Luftvolumenstrom 4 l/min (Versuche 1 und 3) und 8 l/min (Versuche 4 und 6) [65]

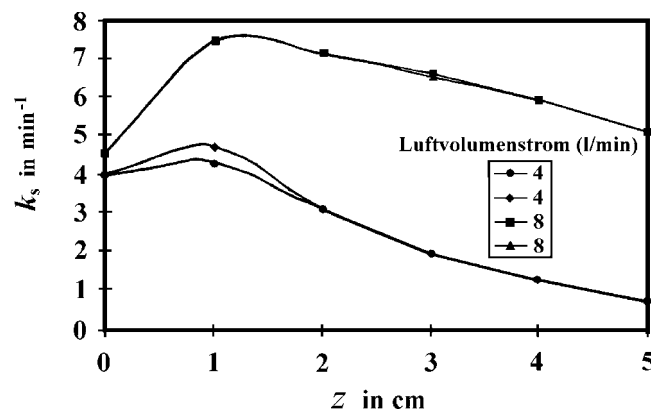


Bild 2.9: Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten der zurückfließenden Feststoffteilchen (k_s), die durch die Trübe mitführung in die Schaumzone gelangt sind, von der Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze z bei der Laborflotation vom Pyrit-Erz mit einer Teilchengrößenklasse 75 ... 150 μm ; Luftvolumenstrom 4 l/min (Versuche 1 und 3) und 8 l/min (Versuche 4 und 6) [65]

Ross [65, 71] hat bei dieser Untersuchung festgestellt, daß sich das Verhältnis der Geschwindigkeitskonstanten der zurückfließenden Feststoffteilchen, die zunächst durch die Trübe mitführung in die Schaumzone gelangt sind, und der Schaumentwässerung mit abnehmendem Luftvolumenstrom vermindert. Der Trübe mitführungsfaktor nimmt somit zu. Das bedeutet, daß sich das Masseverhältnis zwischen Feststoff und Wasser mit zunehmender Schaumhöhe und Verminderung der Dicke der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle im obersten Bereich der Schaumzone vergrößert, wenn der Luftvolumenstrom abnimmt. Daraus resultiert in den Schaumlamellen eine Trübe mit höherer scheinbarer Viskosität und verminderter Geschwindigkeit der zurückfließenden Teilchen. Der Trübe mitführungsfaktor X_{ij} erhöht sich.

Kaya und Laplante [108] haben am Beispiel der Flotation einer synthetischen Mischung aus Quarz und Galenit im Laborflotationsmaßstab gezeigt, daß das Quarzausbringen durch Trübe mitführung bei konstantem Wasserausbringen mit steigendem Luftvolumenstrom und zunehmender Schaumhöhe abnimmt, weil die Wirkung des Luftvolumenstromes weniger signifikant als die der Schaumhöhe ist. Mit Erhöhung des Luftvolumenstroms wird nicht nur das Wasserausbringen, sondern auch das Zurückfließen des Feststoffs sowie des Wassers in die Trübezone (Schaumentwässerung) und die Dicke der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle im obersten Bereich der Schaumzone vergrößert. Jedoch haben andere Autoren festgestellt, daß das Feststoffausbringen durch die Trübe mitführung mit steigendem Luftvolumenstrom zunimmt [19, 21, 51 bis 53, 68, 78]. Gründe dafür sind die Verminderung der Verweilzeit des Schaumes, die Entstehung grober Blasen und die Erhöhung des Trübevolumenstromes von der Trübezone in den Schaum und ins Schaumprodukt.

Einige Arbeiten [19, 68, 69] führen zu dem Schluß, daß das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung bei abnehmender Blasengröße in begrenztem Maße vermindert wird, da kleinere Blasen in der Trübezone eine geringere Aufwärtsgeschwindigkeit haben und eine stabilere und ruhigere Schaumschicht bilden sowie die Störung der Trübe-Schaum-Grenze durch nur schwache Vermischung der Trübe der unteren Schaumschicht vermindern. Allerdings kann bei sehr kleinen Blasen ein so stabiler Schaum auftreten, daß bei einer schlechteren Schaumentwässerung die Einschließung hydrophiler Teilchen und somit eine Erhöhung der Trübe mitführung resultieren [69].

Bisher sind keine Untersuchungen über die Wirkung der Veränderung des Suspensionszustandes der Trübe direkt unterhalb der Schaumzone und der Variation des Flockungszustandes der hydrophilen Teilchen auf die Trübe mitführung bekannt. Außerdem sind wegen der widersprüchlichen experimentellen Ergebnisse über die Wirkungen der Zusammensetzung der Aufgabetrübe, des Feststoffmasseanteils (Trübedichte) und des Luftvolumenstromes sowie dem Zusammenhang zwischen Schaumhöhe und Luftvolumenstrom auf das Feststoffausbringen durch Trübe mitführung weitere Untersuchungen erforderlich. Diese sollen helfen, das Verständnis der Wirkung der

Einflußgrößen auf die Trübe mitführung zu erweitern und zu vertiefen. Darüber hinaus sind die Kenntnisse über den Einfluß der Schaumvorgänge (Schaumentwässerung) und Schaumeigenschaften (Struktur, Mobilität, Stabilität) auf die Trübe mitführung mangelhaft. Bisher gibt es nur wenige Forschungsarbeiten zu diesem Gebiet. Außerdem sind die experimentellen Methoden zur Untersuchung der Schaumvorgänge und -eigenschaften bei der Flotation noch ungenügend entwickelt.

2.1.3 Bisherige Ergebnisse zur Reduzierung der Trübe mitführung

Die Mehrheit der Methoden zur Optimierung der Feinstteilchenflotation, die in der Literatur vorgeschlagen und experimentell untersucht wurden, zielen nicht auf die Reduzierung des Ausbringens durch die Trübe mitführung (z. B. Trägerflotation, Flocken-Flotation, Agglomerationsflotation, Elektroflotation, Vakuum- und Überdruck-Entspannungsflotation) ab [1, 2, 3, 7, 9, 12, 13]. Erst in letzter Zeit wird eine Reduzierung der Trübe mitführung angestrebt, z.B. bei der Kolonnenflotation [55 bis 62, 147 bis 149] und bei der Flotation, in der die Mikroprozesse der Flotation wie turbulentes Zerteilen der Luft in Blasen und turbulente Kollisionen sowie Haftungen der Teilchen an den Blasen (Reaktor) und die Trennung der Teilchen-Blase-Aggregate von der Trübe in den Schaum (Trennungsgefäß) in getrennten Prozeßräumen stattfinden (Pneumatische Zelle [147, 149, 150], Jameson Cell [147, 148, 151 bis 153], Freistrahlf-Flotation [154], Turboflotation [152, 155], Contact Cell [147, 156], Zentrifugalflotation [157 bis 161]).

Trotz des gegenwärtig steigenden Interesses an einer weiteren Aufklärung der die Trübe mitführung verursachenden Phänomene mit dem Ziel ihrer Reduzierung liegen bisher meist nur Untersuchungen zur Beeinflussung des Schaumsystems vor.

Zur Reduzierung der Trübe mitführung hydrophiler Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten sind aus der Literatur folgende Vorschläge bekannt geworden:

a) Entfernen der hydrophilen Teilchen aus der Schaumzone

Hydrophile Teilchen können durch physikalische Maßnahmen aus der Schaumzone entfernt werden. Man spricht in diesem Fall von sekundärer Anreicherung. Tabelle 2.4 zeigt diese Möglichkeiten und den unterschiedlichen Stand ihrer Anwendung. Durch Vergrößerung der Schaumhöhe [39, 43, 49, 50, 51, 53, 65, 68, 87, 116, 162], Beeinflussung des Schaumtransportes mittels Installation von Strombrechern, Gittern oder Platten in der Schaumzone [70, 88 bis 90, 168, 169, 170] sowie durch geeignete Ausbildung der Schaumgeometrie [131, 162 bis 168] kann die Verweilzeit des Schaumes und der Teilchen im Schaum vergrößert werden. Dadurch wird die Trübe mitführung reduziert, da die Wahrscheinlichkeit der Rückkehr der Teilchen zur Trübezone erhöht wird.

Tabelle 2.4: Methoden zur physikalischen Entfernung von hydrophilen Teilchen aus der Schaumzone in mechanischen Flotationsapparaten (vor allem nach Kaya u.a. [129] mit eigenen Ergänzungen)

Geometrisch durch:			Hydraulisch durch:	Mechanisch durch:	
Vergrößerung der Schaumhöhe	Änderung der Schaumkammergeometrie	Änderung des Schaumtransports	geeignete Waschwasserzugabe	Stabbarrieren	Anregung von Schwingungen im Schaum
Erhöhung des Überlaufwehrs oder Luftvolumenstromes [39, 43, 49 bis 51, 53, 68, 87, 116, 162]	High-Grade-Flotationszelle, Bauart Outokumpu [131, 163] Tank Cell, Bauart Outokumpu [162, 164, 165, 166] Smart Cell, Bauart Wemco [167, 168]	Gitter, Platten und Strombrecher [70, 88 bis 90, 168, 169, 170]	perforierte Röhre Zyklonbrausen Sprühdüsen $u_{\text{ww}} = 0,3 - 0,7 \text{ l/(m}^2\cdot\text{s)}^*$ [4, 43, 66, 70, 74, 108, 120, 121, 129, 131, 147, 162, 164, 165, 167, 171 bis 174]	Wemco-Leeds-Säule [121, 175]	Vibratoren Ultraschall [66, 99, 122, 173]
Im Labor-, Pilot- und Betriebsmaßstab	Im Betriebsmaßstab	Im Labor- und Betriebsmaßstab	Im Labor-, Pilot- und Betriebsmaßstab	Im Labor-, Pilot- und Betriebsmaßstab	Im Labormaßstab
Zunahme der Verweilzeit			Abnahme der Verweilzeit Zunahme der Schaumentwässerung Abnahme der Blasenkoaleszenz	Erhöhung der Blasenkoaleszenz Entfernung der Teilchen auf Grund der Vergrößerung der Blasenauftiegeschwindigkeit	

* u_{ww} = Waschwasserleerrohrgeschwindigkeit

Die Verminderung der Trübemitführung kann auch durch geeignete Schaumberieselung mittels Waschwasser realisiert werden. Durch das Waschwasser wird das Verengen der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle durch Ausgleich des Wasserverlustes eingeschränkt und ein zusätzlicher Abstrom erzeugt. Dadurch werden die Schaumentwässerungsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit der zurückfließenden Teilchen in der Schaumzone erhöht, die Schaumstabilität vergrößert und die Wahrscheinlichkeit der Blasenkoaleszenz vermindert. Damit wird das Aufgabewasserausbringen verringert und das Entfernen der Teilchen, die durch Trübemitführung in den Schaum gelangt sind, gefördert [4, 43, 66, 70, 74, 108, 120, 121, 129, 131, 147, 162, 164, 165, 167, 171 bis 174]. Hierfür kommen folgende Waschwasserverteilungssysteme, die entweder Teile oder die gesamte Schaumfläche besprühen, zum Einsatz: Netzwerke perforierter Rohre [66, 74, 108, 129, 171], Zyklonbrausen [4] und Sprühdüsen [120, 121, 131, 163]. Die Auswahl der geeigneten Waschwasserverteilungssysteme basiert auf den jeweiligen Schaumeigenschaften. Bei voluminösem und stabilem Schaum ist die Anwendung von Sprühdüsen zu empfehlen. Hingegen wird bei leicht zerfallendem zerbrechlichem Schaum die Anwendung von perforierten Rohren und Zyklonbrausen vorgeschlagen [66, 129, 172]. Eine Schaumzonenhöhe von etwa 30 cm ist bei der Reinigungsflotation mit Schaumberieselung angemessen [129, 172]. Eine Erhöhung der Waschwassertemperatur bis auf 40 °C verstärkt die Wirkung auf die Reduzierung der Trübemitführung hydrophiler Teilchen durch die Verminderung der scheinbaren Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen und senkt den Waschwasserverbrauch [66, 74, 173]. Als spezifischer Waschwasserstrom werden 0,3 bis 0,7 l/cm² s empfohlen, so daß die dadurch eingebrachte Wassermenge ca. 5 % bis 15 % des Wassergehaltes in der Aufgabetrübe entspricht [66, 129, 172]. Die Schaumberieselung mittels Waschwasser verbessert den Wertstoffgehalt und unter besonderen Bedingungen manchmal auch das Wertstoffausbringen in das Schaumprodukt [43, 129, 172]. *Kaya* und *Laplante* [74, 129, 171] haben festgestellt, daß das Waschwasser drei Wirkungen hat: Schaumreinigung, Trübeverdünnung und Verminderung des Schaumvolumens bei voluminösem Schaum.

Das Entfernen der hydrophilen Teilchen kann auch durch die Anwendung von Stabbarrieren in der Schaumzone [121, 175] oder durch Anwendung von Schwingungen [66, 70, 99, 122, 173] unterstützt werden. Diese Maßnahmen fördern durch Blasenkoaleszenz sowie Verringerung der Blasenaufstiegsgeschwindigkeit das Entfernen hydrophiler Teilchen. Im allgemeinen führt die Anregung von Schwingungen gleichzeitig zu einer Verstärkung der sekundären Anreicherung (Wertstoffgehalt) und zu einem konstanten oder größeren Wertstoffausbringen im Schaumprodukt [122].

b) Veränderung der Trübeeigenschaften

Die Trübemitführung der Feststoffteilchen in die Schaumzone kann einerseits durch die Beeinflussung des Trübevolumenstromes in den Schaum und andererseits durch die Beeinflussung der Feststoffkonzentration in diesem Volumenstrom beeinflusst werden [1]. Aus der Theorie der Blasenschwärme von *Smith* und *Warren* [42] und dem Modell der Trübemitführung als eine Folge des Suspensionszustandes [1] kann man ableiten, daß der Trübevolumenstrom, der in den Schaum gelangt, hauptsächlich von der Belüftung (Luftgehalt) und dem Blasenoberflächenstrom, bezogen auf die Querschnittsfläche der Zelle S_B ($S_B = 6 \cdot Q_L / (A_Q \cdot d_B)$; Q_L Luftvolumenstrom, A_Q Querschnittsfläche der Zelle, d_B Blasendurchmesser) [177, 178], und der Konzentration des Feststoffes in der Trübe unter der Schaumzone abhängig ist und mit dem Luftvolumenstrom und bei Verminderung der Blasengröße anwächst. Wie bereits im Abschnitt 2.1.1.1 erwähnt, sind die Ergebnisse zur Wirkung des Luftvolumenstromes auf die Trübemitführung widersprüchlich und nicht einfach zu erklären. Deshalb ist der Trübevolumenstrom durch diese Größe nur sehr schwer zu steuern. Eine Reduzierung der Feststoffkonzentration in der Trübe unter der Schaumzone ist notwendig, um ihre Konzentration im Trübevolumenstrom zum Schaum zu vermindern. Dies läßt sich durch Trübeverdünnung erreichen, die beispielsweise schon bei der Reinigungsflotation oder bei der Fein- und Feinstteilchenflotation angewendet wird [42, 50, 116]. Eine weitere Möglichkeit, die in der Praxis Anwendung findet, ist die Entschlammung der Aufgabetrübe, das heißt die Abtrennung der Feinstteilchen vor der Flotation [1].

Eine Reduzierung der Feststoffkonzentration unterhalb der Schaumzone kann durch die Beeinflussung des Suspensionszustandes erreicht werden. Dies sollte entweder durch Verminderung der Turbulenzintensität im oberen Trübevolumen mittels entsprechender Gestaltung des Prozeßraumes (geeignete Rotor-Stator-Strombrecher-Systemauswahl [16, 17, 92], Beruhigungseinbauten [92, 176]) oder durch die Vergrößerung der Höhe des Prozeßraumes [108, 179, 180] geschehen. Außerdem ist die Intensivierung der Turbulenz durch die aufsteigenden Blasen und der Einfluß des Luftvolumenstromes auf den Suspensionszustand zu beachten [1]. Bis jetzt sind keine systematischen Untersuchungen über die Wirkung der Reduzierung der Feststoffkonzentration in der Trübezone direkt unterhalb des Schaumes auf die Trübemitführung durch die Beeinflussung des Suspensionszustandes durchgeführt worden.

Experimentelle Untersuchungen haben ergeben, daß durch eine Verminderung des Feststoffvolumenanteils der Trübe [49 bis 52, 116, 128] sowie der scheinbaren Trübeviskosität [22, 30, 31, 109] bzw. die Erhöhung der Trübetemperatur bis 40 °C [74, 86, 108, 173] das Ausbringen feiner hydrophiler Teilchen durch die Trübemitführung reduziert werden kann.

Außerdem sind weitere Vorschläge zur Verminderung der Trübemitführung gemacht worden,

die bisher noch nicht systematisch untersucht wurden. Dies sind insbesondere:

- die Wirkung der Modifizierung selektiver Flockung der hydrophilen feinsten Feststoffteilchen und
- die Beeinflussung der Schaumstruktur, -mobilität und -abzugstechnik.

2.2 Wichtige Aspekte der Turbulenz für die Flotation und Flockung

Der Flotationsprozeß geschieht in mechanischen Flotationsapparaten unter hochturbulenten Strömungsbedingungen ($Re_{D_2} = 2,4 \cdot 10^4$ bis $7 \cdot 10^6$) [1, 181, 182]. Deshalb spielt die Turbulenz für die Teil- und Mikroprozesse der Flotation eine prozeßbestimmende Rolle. Außerdem ist bei der Optimierung des Flotationsprozesses die Rückwirkung der dispersen Phase (Flockungs- bzw. Dispergierungszustand, Feststoffvolumenanteil, Teilchengrößenverteilung) auf die turbulente Strömung zu berücksichtigen, weil sie über die von der Mikroturbulenz gesteuerten Mikroprozesse (Luftzerteilen und Teilchen-Blase-Kollisionen) auch die Kinetik und das Resultat der Makroprozesse beeinflussen kann [1, 14, 16, 17, 83, 183 bis 187]. Die notwendige weitgehende Vereinfachung der komplizierten Gesetze der Turbulenz zu ihrer Anwendung für den Flotationsprozeß und die wichtigen Wirkungen der Turbulenz für mechanische Flotationsapparate sind ausführlich in der Literatur zusammengefaßt [1, 14, 181, 188].

Für den Mikroprozeß Trübe mitführung sind der Suspensionszustand und die Belüftung bedeutsam. Deshalb kann er durch die Makroturbulenz und Mikroturbulenz beeinflusst werden. Die Makroturbulenz bestimmt den turbulenten Teilchentransport und somit das Suspendieren der Teilchen. Die Intensität der Mikroturbulenz bestimmt die Mikroprozesse Zerteilen der Luft und damit die Belüftung. In diesem Zusammenhang werden nur die wichtigsten Aspekte der Turbulenz beim Flotationsprozeß (Suspendieren der Feststoffteilchen, Luftdispergierung, Turbulenzdämpfung durch Feststoffteilchen) und bei der Flockung dargestellt.

2.2.1 Kennzeichnung der turbulenten Strömung

Eine turbulente Strömung kann als Überlagerung einer Grundströmung durch eine große Anzahl von Turbulenzelementen (Wirbel bzw. Wirbelfelder) unterschiedlicher Abmessung und Intensität betrachtet werden. Deshalb werden für die Charakterisierung einer turbulenten Strömung folgende Größen, die in der Literatur definiert und beschrieben sind [1, 181, 188, 189], benötigt: die nach Betrag und Richtung zeitlich gemittelte Strömungsgeschwindigkeit (\bar{u}_i ; $i=x, y, z$), die Komponenten der überlagerten Schwankungsbewegungen, die häufig durch die mittleren Effektivwerte der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeiten ($\sqrt{u_i'^2}$; $i=x, y, z$) beschrieben

werden; der Turbulenzgrad Tu ; der Makromaßstab Λ der Turbulenz, der die Abmessungen der größten aufgetretenen Turbulenzelemente charakterisiert; die örtliche Dissipation ε ; und der *Kolmogorovsche* Längenmaßstab der Mikroturbulenz l_D , der die Abmessung der kleinsten Turbulenzelemente kennzeichnet, deren Energie infolge Viskosität direkt in Wärme umgewandelt wird.

Der Turbulenzgrad ist dort ein geeignetes Maß, wo die Bezugsgröße \bar{u} (mittlere Strömungsgeschwindigkeit) konstant ist. Das Informationsmaß des Turbulenzgrades beschränkt sich auf das Verhältnis von Effektivwert zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit in einem bestimmten Feldpunkt. Aus diesem Grunde ist die Angabe des Turbulenzgrades an verschiedenen Punkten des Strömungsfeldes kein geeignetes Vergleichsmaß für die jeweils dort herrschenden turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen [190]. Bei Strömungsuntersuchungen im Flotationsapparat ist es deshalb üblich, als Maß für die Turbulenz direkt die mittleren Effektivwerte der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit $\sqrt{u_i'^2}$ oder diese bezogen auf die Rotorumfangsgeschwindigkeit (u_r) $\sqrt{u_i'^2}/u_r$ anzugeben [16, 17, 183, 184, 187, 189, 191].

Die in ihrer Abmessung unterschiedlichen Strukturen der Turbulenz erfordern für ihre Modellierung eine Unterteilung in Makro- und Mikroturbulenz, die durch unterschiedliche Gesetze beschrieben werden und für die Teil- und Mikroprozesse unterschiedlich relevant sind [181, 189].

Die Struktur und Intensität der Makroturbulenz werden durch das turbulenz erzeugende System bestimmt. Die Makroturbulenz wird durch den Makromaßstab und den Effektivwert der Schwankungsbewegungen charakterisiert [1, 92, 181]. Bei vollausgebildeter freier Turbulenz (Unabhängigkeit der Strömungs- und Turbulenzparameter sowie der von ihnen abhängigen verfahrenstechnischen Kenngrößen von Re -Zahl) liegt der Makromaßstab in der Größenordnung der Abmessungen der turbulenz erzeugenden Systeme. Deshalb gilt:

$$\Lambda \sim D_0 \quad \text{und} \quad \sqrt{u'^2} \sim u_0 \quad (5)$$

D_0 charakteristische Abmessung des turbulenz erzeugenden Systems

u_0 charakteristische Geschwindigkeit des turbulenz erzeugenden Systems

Die Intensität und Struktur der Mikroturbulenz werden nur durch die Größe des örtlichen Energietransportes ε (Dissipationsrate) und die Viskosität des Fluids ν bestimmt. Als charakteristische Abmessung wird der *Kolmogorovsche* Längenmaßstab der Mikroturbulenz ($l_D = (\nu^3/\varepsilon)^{0,25}$) benutzt [188, 189]. Wird in einen abgeschlossenen Behälter mit einer Suspensionsmasse m durch einen Rührer die Wellenleistung P eingetragen, ergibt sich für die mittlere Dissipation:

$$\bar{\varepsilon} = P/m \quad (6)$$

Die Dissipation ist jedoch im Prozeßraum unterschiedlich groß. Maximalwerte werden im Nachlauf des Turbulenzerzeugers erreicht (das 10- bis 200fache des Mittelwertes, bzw. in Rührapparaten das 5- bis 30fache) [1, 192].

Die Gesetze der Mikroturbulenz dürfen nur angewendet werden, wenn die Abmessungen der Wirbel $r_w \leq 0,12 \Lambda$ bzw. $\lambda \leq 0,5 \Lambda$ (r_w Wirbelradius und λ Wellenlänge der Turbulenzelemente ($\lambda = 4 \cdot r_w$)) und die Turbulenz vollausgebildet ist, d.h. $\Lambda/l_D \leq 150$ bis 200 [1, 181]. Es werden drei Bereiche der Mikroturbulenz unterschieden [1, 83, 92, 189]:

- a) Dissipationsbereich ($\Delta r/l_D \leq 5$ bis 10) (Δr Abstand zwischen zwei voreinander liegenden Punkten),
- b) Übergangsbereich ($\Delta r/l_D = 5$ bis 20) und
- c) Trägheitsbereich (15 bis $20 \leq \Delta r/l_D \leq 0,12 \cdot \Lambda$).

Aus der Literatur [1, 14, 16, 83, 181, 189, 193, 194, 195] kann zusammengefaßt werden, daß je höher die Turbulenzintensität bzw. die Energiedissipation ist,

- desto stärkere Spannungen wirken auf die suspendierten Teilchen (Blasen, beladenen Blasen, Tropfen) und Flocken,
- desto kleiner ist die stabile Flockengröße und Blasengröße (s. Abschnitte 2.2.4 und 2.3.3),
- desto größer ist die Kollisionsrate der suspendierten Teilchen.

2.2.2 Suspendierung des Feststoffs in mechanischen Flotationsapparaten

Durch die stetige Erhöhung der Drehzahl eines Rührwerkes (Erhöhung des Leistungseintrags) können am Boden lagernde Feststoffe suspendiert werden. Dabei werden zunächst die feineren und anschließend die gröberen Anteile durch die Grundströmung transportiert. Es wurden verschiedene Kriterien entwickelt, um den Suspensionszustand in Rührmaschinen zu charakterisieren. Ein solches Kriterium ist die minimale Drehzahl (Suspendierdrehzahl), bei der der Suspendierungspunkt erreicht wird. In diesem Zustand ist der Feststoff vollständig aufgewirbelt, aber noch nicht homogen suspendiert (vollständige Aufwirbelung). Einzelne Teilchen bleiben nicht länger als etwa 1s am Zellenboden (1s-Kriterium). Ein anderer Kennwert ist die Drehzahl, bei der eine homogene Verteilung der Feststoffteilchen im gesamten Prozeßraum erreicht wird (homogene Suspension) [188]. Der Suspensionszustand kann auch unmittelbar durch die Messung der lokalen Teilchenkonzentration beurteilt werden [196]. Die Messung der Teilchenverteilung zur Gewinnung der Konzentrationsprofile kann durch Entnahme von Proben [197, 198], optische Technik [199], Ultraschalltechnik [200], elektrische Technik (Leitfähigkeit bzw. Dielektrizität) [201] und Absorption von γ -Strahlung [202] realisiert werden.

Für das 1s-Kriterium gibt es in der Literatur Modelle, um die minimale Drehzahl quantitativ zu bestimmen [1, 181, 188].

Aus den Diffusionsmodellen zum turbulenten Teilchentransport in dünnen Suspensionen (s. Bild 2.2 in Abschnitt 2.1) kann man die qualitative Aussage ableiten [1, 14, 181], daß die Feststoffteilchen homogen in der Trübe verteilt sind, wenn gilt:

$$v_m H / D_t \lesssim 0,1 \quad (7)$$

v_m stationäre Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens

H Trübehöhe im Prozeßraum

D_t turbulenter Diffusions- bzw. Transportkoeffizient

$$D_t = \sqrt{u'^2} \Lambda \sim u_o D_o \quad (8)$$

Die Gleichung in Bild 2.2 (Abs. 2.1) stellt jedoch eine weitreichende Vereinfachung dar: Feststoffvolumenanteil der Suspension $\varphi < 0,05$ (freie Beweglichkeit der Teilchen, vernachlässigbare Rückwirkung der Feststoffteilchen auf die Strömungsturbulenz, keine Feststoffteilchenagglomeration), Feststoffteilchen klein gegenüber dem Makromaßstab der Turbulenz (turbulenter Diffusionskoeffizient der Teilchen und des Fluids sind gleichgesetzt), stationärer Zustand, Isotropie der Turbulenz, homogenes Turbulenzfeld. Sie liefert das Konzentrationsprofil beliebiger Partikelgrößen (Teilchengrößenklassen) in Richtung des Kraftfeldes im Zweiphasensystem. Unter Beachtung des turbulenten Charakters der Strömung sind die feinsten Teilchen mehr oder weniger homogen in der Trübe suspendiert. Deshalb verlassen sie den Prozeßraum proportional zum Flüssigkeitsstrom. Das ist die Hauptursache für die Trübemithführung der feinsten Partikel in den Flotationsschaum.

2.2.3 Einfluß der Feststoffteilchen auf die Turbulenz

Im allgemeinen dämpfen die feinen Feststoffteilchen die Turbulenz in flüssigen Phasen im Vergleich zum reinen Fluid. Die Dämpfung ist abhängig von Konzentration und Feinheit der suspendierten Feststoffe. Jedoch könnten grobe Feststoffteilchen ($Re_p = v_s d_p / \nu \geq 300$, Re_p auf die Teilchengröße d_p bezogene Reynolds-Zahl, v_s Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens, ν Suspensionsviskosität) aufgrund ihres turbulenten Nachlaufs auch die Turbulenz anfahren [1, 189].

Bei Teilchen, die im Größenbereich der kleinsten Wirbel liegen, läßt sich die Turbulenzdämpfung durch eine zusätzliche Energiedissipation erklären. Sie wird durch die laminaren Relativbewegungen zwischen Teilchen und den einhüllenden Turbulenzelementen, verursacht durch die Geschwindigkeitsschwankungen, hervorgerufen [185, 187]. Dieses Zweiphasenmodell gilt jedoch nicht bei Teilchen, die viel kleiner als die kleinsten Wirbel sind, da diese Partikeln den Geschwindigkeitsschwankungen des Fluids praktisch schlupflos folgen sollten

[189]. Betrachtet man dieses Zweiphasensystem als Kontinuum, kann die Turbulenzdämpfung durch die Erhöhung der scheinbaren Viskosität erklärt werden [17, 191]. In diesem Falle spielen offensichtlich die Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen der Suspension eine entscheidende Rolle. Je besser die Dispergierung sehr feiner Teilchen, desto geringer ist die Dämpfung der Turbulenz [17, 191].

Der Makromaßstab Λ wird jedoch durch die Zugabe des Feststoffs im Vergleich zur reinen Flüssigkeit kaum verändert [183, 185, 187].

Mit Zunahme der Turbulenzdämpfung ist auch eine Beeinträchtigung der von der Mikroturbulenz gesteuerten Mikroprozesse Gasblasen-Zerteilen und Teilchen-Blase-Kollisionen zu erwarten. Dieser nachteilige Effekt dürfte sich vor allem auf die Prozeßkinetik auswirken [16, 191].

2.2.4 Luftdispergierung

Führt man dem Rotorbereich Luft zu, kommt es zur Bildung von luftgefüllten Hohlräumen an der Abströmseite der Rotorelemente (Blätter, Schaufeln, Stäbe, Finger usw.). Die Blasen sind in der turbulenten Strömung zum einen der turbulenten Beanspruchung (Beanspruchung der Blasenoberflächen durch die Wirbel) ausgesetzt. Zum anderen hat der Kapillardruck einen stabilisierenden Effekt. Das Gleichgewicht zwischen beiden Spannungen bestimmt die Größe der Gasblasen. Im Trägheitsbereich der Mikroturbulenz sind die Druckschwankungen größer als die Scherbeanspruchungen. In diesem Bereich der Mikroturbulenz kann die Beanspruchung der Blasen durch Druckschwankungen $\sqrt{\Delta p'^2}$ und die daraus resultierende oszillierende Deformation zum Zerteilen der Blasen führen. Dies geschieht, wenn das Verhältnis der Druckschwankungen zum Kapillardruck p_k , das als Weber-Zahl bezeichnet wird, einen kritischen Wert We_c überschreitet [1]:

$$\frac{\sqrt{\Delta p'^2(d_B)}}{p_k} \sim \frac{\rho_l \cdot \epsilon^{2/3} \cdot d_B^{5/3}}{\sigma_{lg}} = We > We_c \quad (9)$$

Die maximale noch stabile Blasengröße ($d_{B,max}$) wird folglich durch die örtliche Dissipation ϵ sowie die Oberflächenspannung σ_{lg} bestimmt. Das Zerteilen geschieht vorrangig in den Flüssigkeitsgebieten, in denen die örtliche Dissipation ein Maximum erreicht, also im Fall mechanischer Flotationsapparate im Nachlauf der umströmten Rotorelemente. Für $12 l_D \leq d_B \leq 0,06 \Lambda$ gilt somit:

$$d_{B,max} = We_c^{0,6} \left(\frac{\sigma_{lg}}{\rho_l} \right)^{0,6} \epsilon_{max}^{-0,4} \quad (10)$$

Auch auf beladene Blasen wirken die turbulenten Schubspannungen. Folglich existiert bei gegebener Energiedissipation nicht nur eine maximale stabile Blasengröße, sondern auch ein maximaler stabiler Aggregatdurchmesser und damit eine maximal flotierbare Teilchengröße. Deshalb sollte man bei der Flotation grober Teilchen mit dem geringst möglichen Leistungseintrag arbeiten (geringe Energiedissipation). Dies begünstigt die Bildung größerer Blasen und bewirkt zugleich geringere turbulente Beanspruchungen.

2.2.5 Hydrodynamische Charakterisierung der Makroprozesse in mechanischen Flotationsapparaten

Zur Bewertung der Hydrodynamik in mechanischen Flotationsapparaten werden verschiedene dimensionslose Kennzahlen herangezogen (Tabelle 2.5). Im folgenden soll vor allem auf den Leistungsbeiwert c_p und die Luftströmungs-Zahl c_L näher eingegangen werden.

Tabelle 2.5: Dimensionslose Kennzahlen zur Beurteilung der Hydrodynamik in mechanischen Flotationsapparaten (nach [1])

Kennzahl	Definition	Werte in modernen industriellen Apparaten
Reynolds-Zahl	$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D_2^2}{\eta}$	(0,7 bis 4) $\cdot 10^6$
Froude-Zahl	$Fr = \frac{n^2 D_2}{g}$	0,4 bis 1,5
Leistungsbeiwert	$c_p = \frac{P_{bt}}{\rho \cdot n^3 \cdot D_2^5}$	2 bis 9
Luftströmungs-Zahl	$c_L = \frac{Q_L}{n \cdot D_2^3}$	0,07 bis 0,3
Weber-Zahl	$We = \frac{\rho \cdot n^2 \cdot D_2^3}{\sigma_{lg}}$	

Der Leistungsbeiwert ist eine sehr wichtige integrale Beurteilungsgröße für ein Rotor-Stator-System. Außerdem ist er ein wesentliches Übertragbarkeitskriterium für die Auslegung von Flotationsapparaten, weil er von der Zellengröße unabhängig sein sollte. Der Leistungsbeiwert wird stark von dem Grad der Belüftung und Geometrie des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems beeinflusst [1, 92, 183, 184, 189, 192].

Der spezifische Leistungseintrag (Leistungseintrag je Einheit begasten Zellenvolumens) ist ein wichtiger Parameter zur Bewertung des Flotationserfolges von feinen und groben Teilchen sowie der Betriebskosten der Flotationszelle und stellt ein wesentliches hydrodynamisches Übertragbarkeitskriterium ($P_{bt}/V_{bt} = \text{const}$) dar [1, 93, 97, 98, 182, 188, 203, 204].

Die Luftströmungs-Zahl ist das Verhältnis von mittlerer Luftaufstiegsgeschwindigkeit zur Rotorumfangsgeschwindigkeit. Sie ist ebenfalls eine wesentliche, von verschiedenen Autoren genutzte hydrodynamische Größe ($c_L = \text{const}$) [1]. Allerdings eignet sich c_L erst ab einer Mindestzellengröße von 30 l als hydrodynamisches Übertragbarkeitskriterium, da sich bei kleineren Zellen keine vollausgebildete freie Turbulenz entwickeln kann. Dieser Parameter charakterisiert das notwendige Gleichgewicht zwischen Luftzufuhr und Trübesuspendierung. Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Luftzuführung kann zu einer Minderung des Ausbringens führen. Bei zu starker Luftzuführung wird die Trübeoberfläche aufgewühlt. Im zweiten Fall tritt eine Verringerung der kinetischen Geschwindigkeitskonstante der Flotation ein [168, 182]. Mit der Luftströmungs-Zahl ist die Luftleerrohrgeschwindigkeit verknüpft. Die Luftleerrohrgeschwindigkeit ist definiert als das Verhältnis von Luftmenge Q_L zu Querschnittsfläche der Zelle A_Q (Schaumoberfläche). Die Wichtigkeit dieses Parameters wird darin deutlich, daß eine Verminderung dieser Größe bei konstanter Flotationszeit und Rotordrehzahl zu einer Abnahme des Ausbringens hydrophober Teilchen führt. Extrem hohe Werte bewirken Oberflächenturbulenzen bzw. einen Luftdurchbruch der Trübezonenoberfläche, d. h., die Möglichkeit, die zugeführte Luft zu zerteilen, wird überschritten (Überflutungspunkt) [168, 188, 204].

Für die Beurteilung von Flotationsprozessen in mechanischen Apparaten interessiert vor allem der Zusammenhang

$$P_{bt}/V_{bt} = f(c_L) \quad (11)$$

P_{bt} Leistung, die vom Rotor an die belüftete Trübe übertragen wird

V_{bt} Volumen der begasten Trübe

Es existiert eine Grenz-Luftströmungs-Zahl $c_{L,1s}$, die mit dem 1s-Kriterium im Zusammenhang steht. Wird dieser Grenzwert überschritten (s. Gl. 12), so beginnt der Feststoff mehr und mehr zu sedimentieren:

$$c_{L,1s} = \frac{Q_{L,1s}}{n_{1s} \cdot D_2^3} \quad (12)$$

Die Feststoffsedimentation ist im Fall der Flotation unbedingt zu vermeiden. Grobteilchen sollten jedoch in der Nähe von $c_{L,1s}$, Feinteilchen dagegen bei wesentlich höheren Leistungseinträgen (kleineren $c_{L,1s}$) flotiert werden. Dieses Verhalten läßt sich auf der Grundlage der Mikroprozesse erklären. Danach sind für feine Teilchengrößenklassen hohe Kollisionsraten (durch höheren Leistungseintrag) günstig. Bei groben Teilchen sind jedoch größere Luftblasen erforderlich (Auftriebsvermögen) und die Beanspruchung der Teilchen-Blase-Aggregate

im Turbulenzfeld darf nicht zu groß sein (d.h. geringstmöglicher Leistungseintrag) [1, 14].

Zur Realisierung des 1s-Kriteriums gilt für den Leistungseintrag:

$$(P_{bt}/V_{bt})_{1s} = K_3 \cdot (c_{L,1s})^p \quad (13)$$

Der Exponent p hängt vor allem von der Ausbildung des Rotor-Stator-Systems ab. Er wächst mit dessen Luftempfindlichkeit. K_3 wird bei gegebenem System durch die Stoffwerte der begasten Suspension bestimmt [1].

In den letzten Jahren haben *Gorain u. a.* [177] den auf die Querschnittsfläche A_Q der Flotationszelle bezogenen Blasenoberflächenstrom ($S_B = (6 \cdot u_L)/d_B$) als eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der Luftzerteilung und des Flotationserfolges eines Flotationsprozesses in der mechanischen Flotationszelle vorgeschlagen. Diese Kenngröße schließt nicht nur das Belüftungsvermögen einer Flotationszelle (u_L), sondern auch die Intensität der Luftzerteilung (d_B) ein. Außerdem kann mit dem Blasenoberflächenstrom (S_B) die Verbindung zwischen Luftzerteilung und Flotationserfolg durch die Bestimmung der von *Gorain u. a.* [178] vorgeschlagenen Abhängigkeit zwischen k (Geschwindigkeitskonstante der Flotation) und S_B beschrieben werden.

2.3 Flockung mineralischer Feststoffe

Feine Feststoffteilchen können in einer Suspension dispergiert oder agglomeriert (geflockt) sein. Im erstgenannten Falle liegen sie als gegeneinander frei bewegliche Einzelteilchen vor, im zweiten Fall demgegenüber in Form von Agglomeraten (Flocken). Für die Agglomeration (Flockung) feinsten Feststoffteilchen in wässrigen Suspensionen haben in den letzten Jahrzehnten organische Makromoleküle ständig an Bedeutung gewonnen [181]. Es handelt sich dabei um ketten- oder fadenförmige, wasserlösliche Makromoleküle (Polymere), die in relativ engen Abständen bindungsaktive Gruppen besitzen. Diese Gruppen sind nichtionogenen oder ionogenen Charakters und unter geeigneten Voraussetzungen befähigt, mit Teilchenoberflächen in Wechselwirkung zu treten. Diese Bindung beruht auf Wasserstoffbrücken, elektrostatischer Adsorption, Chemisorption und hydrophoben Wechselwirkungen. Dieser Bindungsvorgang wird im folgenden als Flockung bezeichnet [181, 205 bis 208].

Auf dem Gebiet der Mineralaufbereitung ist der Einsatz von Polymeren bereits weit verbreitet. Das Einsatzspektrum der Stoffe erstreckt sich dabei von der Wasseraufbereitung über die Mahlung bis zur Flotation, selektive Flockung und Entwässerung der Konzentrate [188, 205, 206].

2.3.1 Polymere

Die Polymere können auf verschiedene Arten nach einer oder mehreren Eigenschaften eingeteilt werden, z.B. nach Molmasse, bindungsaktiven Gruppen, nach Ladungscharakter, chemischer Struktur oder Herkunft (natürlich oder synthetisch) [205].

Insbesondere synthetische Flockungsmittel bringen bei zweckmäßiger Auswahl und unter optimalen Einsatzbedingungen stärkere Effekte (größere und stabilere Flocken) als die Agglomeration durch Adhäsionskräfte [181]. Typische Flockungsmittel bestehen aus langkettigen Molekülen mit Molmassen von 10^6 und größer. Synthetische makromolekulare Flockungsmittel werden in:

- a) nichtionogene Polymere (vor allem Polyacrylamide),
- b) anionische Polymere (vor allem Polyacrylate),
- c) kationische Polymere (wie z.B. Polydiallyldimethylammoniumchlorid),
- d) Copolymere, vorwiegend mit nichtionogenen und ionogenen Gruppen (z.B. Amid- und Acrylat-Gruppen) [181], unterteilt.

Der Charakter der polaren Gruppe bestimmt in einem gegebenen System die möglichen Wechselwirkungen mit den Teilchenoberflächen [181, 205, 207, 209]:

- a) Wasserstoffbrückenbindung tritt zwischen -OH und -NH₂ oder ähnlichen Gruppen und geeigneten Partner der Teilchenoberfläche (Atomgruppen, die z. B. die elektronegativen Elemente O, F, N und Cl enthalten) bzw. der Hydrathülle auf. Obwohl die Bindungsenergie relativ gering ist (25 kJ/mol), kann wegen der hohen Zahl an aktiven Gruppen eine hohe Bindungsstabilität erreicht werden.
- b) Elektrostatische Adsorption (unspezifische Wechselwirkungen) tritt zwischen den ionogenen Gruppen der Flockungsmittel (z.B. -COO⁻, -NH₃⁺) und den entgegengesetzt geladenen Teilchenoberflächen auf (Adsorption in der elektrischen Doppelschicht).
- c) Bei der Chemisorption entsteht eine Bindung auf Grund der chemischen Bindungskräfte (z.B. zwischen Ca-Mineralen und -COOH-Gruppen).

Neben diesen Mechanismen weisen *Moudgil und Behl* [207] auf die Möglichkeit hin, daß Teilchen im Netzwerk von Polymeren eingeschlossen werden. Als weiteren Flockungsvorgang führen diese Autoren [207] den lokalen Mechanismus der Ladungsneutralisation an. Dabei neutralisieren ionische Polymere mit niedrigen und mittleren Molmassen, aber hoher Ladungsdichte, die lokale Ladung der einzelnen beladenen Teilchen durch ihre Adsorption. Dann ist die elektrostatische Abstoßung zwischen Teilchen abgebaut und sind wieder die Bedingungen für die Flockung der Teilchen gegeben.

Auf der Grundlage des Wirkungsmechanismus der Überbrückungsflockung lassen sich folgende Anforderungen an Größe und Struktur der Polymere formulieren [181, 210]:

- Es ist eine genügende Länge der Makromoleküle erforderlich, die in Lösung weitgehend in gestreckter Form vorliegen sollten.
- Die Anzahl der bindungsaktiven Gruppen muß genügend groß und ihre Wechselwirkung mit der Teilchenoberfläche genügend intensiv sein.
- Die Makromoleküle sollten vielfältig einsetzbar und schon bei relativ niedriger Konzentration den gewünschten Effekt hervorbringen.

2.3.2 Wichtige Einflußgrößen auf die Flockung sowie Größe, Struktur und Form der Flocken

Als wesentliche Einflußgrößen auf Größe, Struktur und Stabilität der Flocken werden die Molmasse, die Zugabemenge und die Dosierung der Polymere sowie die Turbulenzintensität des Mischungsprozesses angesehen [181, 205 bis 207, 209, 211, 212]. Weitere Möglichkeiten der Beeinflussung werden in [207] genannt.

Da die Mechanismen der Flockung bisher nur ungenügend aufgeklärt sind, ist es nur beschränkt möglich, gezielt Flocken mit bestimmten Eigenschaften zu erzeugen [207]. So wären beispielsweise für die Reduzierung der Trübe mitführung kleine, dichte, stabile und kompakte Flocken erforderlich, weil sie vermutlich eine Begünstigung der Schaumentwässerung und des Zurückfließen der hydrophilen Teilchen erzeugen könnten.

Die Wahl von Polymeren hoher Molmasse wirkt effizienter auf die Flockung als die Erhöhung der Zugabemenge von Molekülen mit kürzeren Ketten [207, 210, 212]. Je größer die Molmasse ist, desto besser kann das Molekül seine Brückenfunktion wahrnehmen (größere Anzahl bindungsaktiver Gruppen). Mit zunehmender Molmasse werden die Adsorption und die Bildung großer stabiler Flocken begünstigt. Die obere Grenze der anwendbaren Molmasse ergibt sich entweder durch die mit dieser abnehmenden Löslichkeit, die erforderliche Durchmischung nach dem Zusatz zur Trübe (Zunahme der Viskosität der Lösung, geringe Diffusionsgeschwindigkeit) oder die Art der Herstellung (Handhabung von Granulat oder Emulsion) [181, 206, 212, 213].

Die Menge und Art der Zugabe des Polymers sind wichtige Faktoren für die Struktur der gebildeten Flocken. Es gibt eine optimale Dosierung. Geringere Polymerzugaben verursachen eine unvollständige Flockung. Zu hohe Zugabemengen führen zu einer sterischen Stabilisierung der Feststoffteilchen in der Suspension (Überschuß-Adsorption). In verschiedenen Untersuchungen hat sich gezeigt, daß eine mehrfache Dosierung (z.B. stufenweise Dosierung) günstiger bzw. wirksamer ist [206, 207, 212, 214, 215].

Die Turbulenzintensität des Mischungsprozesses begrenzt letztlich die entstehende Flockengrößenverteilung. Diese stellt sich in Abhängigkeit von der Beanspruchung der Teilchenaggregate im Turbulenzfeld und der Flockenstabilität ein. Gewöhnlich wird die Beziehung zwischen der maximalen Flockengröße $d_{F,max}$ und der Energiedissipation ε (bzw. spezifischer Leistungseintrag) als Maß für die Flockenstabilität genutzt [194]:

$$d_{F,max} = K_2 \varepsilon^{-n} \quad (14)$$

Im Flockenfestigkeitskoeffizienten K_2 sind die zwischen den Feststoffteilchen wirkenden Haftkräfte sowie die Flockendichte implizit enthalten. Unter Einbeziehung dieser Größen kann mittels physikalisch begründeter Näherungsgleichungen die maximale stabile Flockengröße abgeschätzt werden [194].

Die Flockenzerteilung infolge der Einwirkung von Strömungskräften kann grundsätzlich nach zwei Mechanismen erfolgen: durch Flockenaufbruch und durch Flockenerosion. Flockenaufbruch bezeichnet das Durchtrennen des Flockenkörpers infolge von Normalspannungen. Bei der Flockenerosion werden auf Grund von Scherspannungen Einzelteilchen bzw. Mikrofloccen aus der Flockenhülle herausgerissen [195, 209].

Neben dem Leistungseintrag bestimmt auch die Dauer des Mischungsprozesses die Struktur und Eigenschaften der gebildeten Flocken [207, 211, 212, 215].

3 Versuchsdurchführung

Das Versuchsprogramm konzentriert sich auf Untersuchungen zur Wirkung einiger wichtiger Prozeßparameter (Zusammensetzung der Aufgabetrübe, spezifischer Luftvolumenstrom, Schaumhöhe und Feststoffmasseanteil in der Trübe), zur Beeinflussung des Suspensionszustandes im Bereich direkt unterhalb der Schaumzone und zur Änderung des Flockungszustandes der hydrophilen Teilchen auf die Trübemithführung und deren Reduzierung in mechanischen Flotationsapparaten. Daneben sind Untersuchungen zur Flotierbarkeit des Quarzes und Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des Versuchsgutes und der Schaumprodukte erfolgt. In diesem Abschnitt werden das eingesetzte Standardflotationssystem, die Standard-Versuchsbedingungen und die Untersuchungen zur Beeinflussung des Suspensionszustandes sowie Modifizierung des Flockungszustandes der hydrophilen Teilchen näher erläutert.

3.1 Standardflotationssystem und –Versuchsbedingungen

Das Standardflotationssystem besteht aus einer mechanischen Laborflotationszelle. Die Standard-Versuchsbedingungen sind durch die Durchführung der Voruntersuchungen zum Einfluß der Rotordrehzahl, der Schaumart und -zugabe, der Sammlerzugabe sowie des Luftvolumenstromes und die Entwicklung der Methode zur Bestimmung des Ausbringens durch Trübemithführung festgelegt worden. Im folgenden werden die Versuchsanlage, das verwendete Versuchsgut, die eingesetzten Reagenzien sowie Versuchsbedingungen und die neue entwickelte Methode zur Bestimmung der Trübemithführung beschrieben.

3.1.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Als Standardflotationszelle wurde eine 3,4-l-Zelle (Eigenbau, ehemals FIA⁴) mit dem H/D_1 -Verhältnis 1,0 (H – Zellenfüllhöhe im begasten Zustand: 15,2 cm; D_1 – Kantenlänge der Zellenquerschnittsfläche: 15,0 cm) eingesetzt. Der Rotor wird von unten angetrieben und somit der Schaumabzug über die gesamte Schaumfläche ermöglicht. Bild 3.1 zeigt die Standardflotationszelle (mit Bauart B bezeichnet), die bei der Erprobung der verschiedenen Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme zur Anwendung kam. Das Rotor-Stator-Strombrecher-System der Standardzelle, das von der TU Bergakademie Freiberg entwickelt worden ist [16, 92], besteht aus einem Doppelfingerrotor und einem Stator mit radial ausgerichteten und hochgezogenen Blättern. Die wichtigsten Abmessungen und geometrischen Verhältnisse dieses Systems und der

⁴ Forschungsinstitut für Aufbereitung (FIA) der Akademie der Wissenschaften der ehemaligen DDR, Freiberg.

Zelle sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Der Rotor wurde über einen Keilriemen von einem Gleichstrommotor angetrieben. Durch Änderung der Klemmenspannung am Regeltrafo konnte die Drehzahl stufenlos verändert werden. Die Drehzahlmessung erfolgte über einen Frequenzanzeiger, der die Zahl der optischen Impulse anzeigt, die eine auf der Riemenscheibe angebrachte Markierung beim Vorbeilaufen am Meßfühler hervorruft. Die Luft wurde durch einen Kompressor erzeugt und über einen Luftdruckregler, Schwebekörper-Durchflußmesser und Luftverteiler unter dem Rotor der Trübe zugeführt.

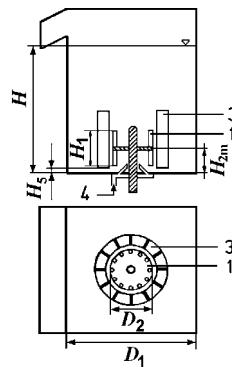


Bild 3.1: Skizze der 3,4-l-Standardflotationszelle, Bauart B, mit den wichtigsten Abmessungen.
(1) Rotor, (3) Stator und (4) Luftverteiler.

Tabelle 3.1: Wichtigste Abmessungen und geometrische Verhältnisse der 3,4-l-Standardflotationszelle und des verwendeten Rotor-Stator-Systems

Bauelemente	Abmessungen und geometrische Verhältnisse	
Standardzelle	Volumen der begasten Trübe V_{bt} (l)	3,4
	Kantenlänge der Zelle D_1 (cm)	15,0
	Füllhöhe im begasten Zustand H (cm)	15,2
	H/D_1	1,0
Doppelfingerrotor	Rotordurchmesser D_2 (cm)	5,5
	Einbauhöhe des Rotors H_{2m} (cm)	2,5
	Relative Einbauhöhe des Rotors H_{2m}/D_1 (cm)	0,17
	D_2/D_1	0,37
	Höhe des Rotorfingers H_1 (cm)	3,0
	H_1/D_1	0,058
	H_1/D_2	0,54
	Durchmesser des Rotorfingers l (cm)	0,5
Stator	l/D_2	0,09
	Anzahl des Rotorfingers z_R	12
	Innendurchmesser des Statorrings D_3 (cm)	6,3
	Außendurchmesser des Statorrings D_4 (cm)	8,5
	Statorhöhe H_4 (cm)	6,8
	Einbauhöhe des Stators H_5 (cm)	0,5
	Anzahl der Statorblätter z_L	12
	D_3/D_1	0,42
	D_4/D_1	0,57
	H_4/D_1	0,45

Die Abmessungen und die geometrische Ausbildung des verwendeten Doppelfingerrotors sowie

des Schaumabstreifers sind in Bild 3.2 dargestellt. Die Tiefe des Schaumabstreifers (l_s) wurde so gewählt, daß die Unterkante jeweils 5 mm tief in der Schaumzone liegt. Jedoch ist diese Tiefe der Unterkante bei den Untersuchungen zum Einfluß der Schaumhöhe H_{sch} variiert worden und zwar: 2 mm bei $2 \leq H_{sch} < 5$ mm und 5 mm bei $H_{sch} \geq 5$ mm.

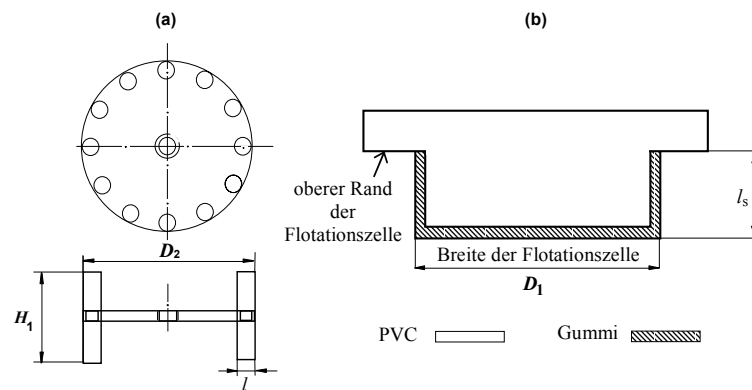


Bild 3.2: Skizze des Doppelfingerrotors a) und Schaumabstreifers b) mit den wichtigsten Abmessungen

3.1.2 Verwendete Materialien

Versuchsgut

Als Versuchsgut wurde eine synthetische Mischung von Fluorit aus Schönbrunn und Quarz aus Frauenstein (vorwiegendes massebezogenes Mischungsverhältnis - 1:1) verwendet. Die chemische Zusammensetzung und Dichte des Versuchsguts sind in Tabelle 3.2 wiedergegeben.

Tabelle 3.2: Chemische Zusammensetzung und Dichte des Versuchsguts

Teilchengrößenklasse (μm)	Probe	Gehalt (%)					Dichte* (g/cm^3)
		CaF ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃	Gesamt	
71 ... 200	Fluorit	91,2	6,3	0,1	0,5	98,1	3,17
<40	Quarz	0,0	98,4	0,8	0,1	99,3	2,69

* Dichtebestimmung mit Multivolume Pyknometer 1305 – Micrometrics

Der Quarz wurde ausgewählt, weil er das hauptsächliche Gangartmineral von Erzen ist und in der Literatur schon Gegenstand von Untersuchungen zur Trübeimführung war [10, 22, 33, 39, 42]. Der Fluorit wird für die Untersuchungen als günstig angesehen, weil er eine gute Flotierbarkeit besitzt und das Reagensregime zu seiner Flotation hinreichend bekannt ist [1].

Um die quantitative Bestimmung der Trübeimführung zu vereinfachen, sind unterschiedliche Teilchengrößenklassen der beiden Probematerialien benutzt worden, und zwar Fluorit (71 ... 200 μm ; $d_{50} = 134,5$ μm) und Quarz (< 40 μm ; $d_{90} = 29,4$ μm sowie $d_{90} = 11,3$ μm). Die Quarzprobe mit $d_{90} = 29,4$ μm ist im folgenden mit der Abkürzung Q₁ bezeichnet. Sie wurde bei der Untersuchung der Wirkung wichtiger Prozeßparameter und der Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme verwendet. Die Quarzprobe mit $d_{90} = 11,3$ μm wird nachfolgend mit

der Abkürzung Q_2 bezeichnet. Sie diente der Untersuchung der Wirkung des Suspensionszustandes (außer bei den Untersuchungen zur Anwendung der Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme), des Feststoffmasseanteils in der Trübe sowie der Flockung hydrophiler Teilchen. Die Teilchengrößenanalysen des eingesetzten Versuchsgutes sind im Bild 3.3 dargestellt.

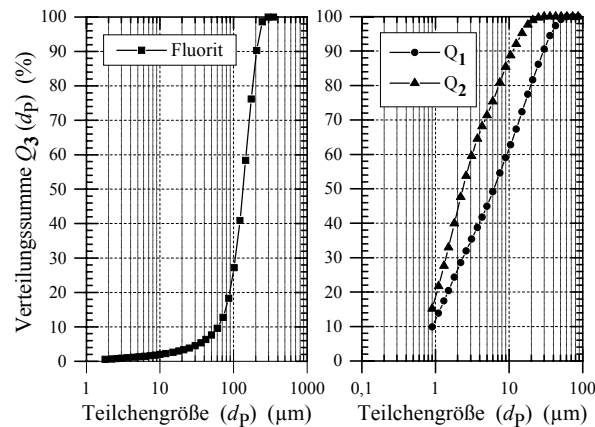


Bild 3.3: Teilchengrößenverteilung des Versuchsgutes mit Laserbeugungsmeßmethode

Die Fluoritprobe wurde durch trockene Aufmahlung in einer Laborsiebkgelmühle bis zu einer Teilchengrößenklasse $<200 \mu\text{m}$ zerkleinert, entschlämmt und durch Trockensiebklassierung in einer Pilot-Schwingstoßsiebmaschine hergestellt. Die verwendete Teilchengrößenklasse der Quarzprobe wurde durch trockne Zerkleinerung in einer kleintechnischen Rohrschwingmühle nach der Bestimmung der Mahlungsbedingungen erzeugt.

Reagenzien

Bei der Flotation kamen als Reagenzien Natrium-Oleat als Sammler (200 g/t) (100 %iges Verseifen von Ölsäure p. a. mit NaOH), Natriumsilikat (Na_2SiO_3 , Wasserglas) als Dispergiermittel (250 g/t), Metylisobutylcarbinol (MIBC) als Schäumer (500 g/t) und Na_2CO_3 als pH-Regler zum Einsatz. Die Zugabemenge der Reagenzien wurde durch Voruntersuchungen bestimmt.

Tabelle 3.3: Verwendete Polymere

Ladungscharakter	Typen*	Beschreibung
stark kationisch	185K	niedrigmolekularer, stark kationischer Polyelektrolyt auf der Basis eines quaternären Acrylsäurederivates
stark kationisch	187K	niedrigmolekularer, stark kationischer Polyelektrolyt auf der Basis von Polydimethyldiallylammoniumchlorid
stark kationisch	655BC	hochmolekularer, stark kationischer Polyelektrolyt auf der Basis eines kationischen Acrylamidderivates
mittel anionisch	2440	mittelmolekularer, mittel anionischer Polyelektrolyt auf der Basis von Polyacrylamid
mittel anionisch	A3040L	hochmolekularer, mittel anionischer Polyelektrolyt auf der Basis von Polyacrylamid

*Praestol-Marken der Firma Stockhausen, Krefeld, Deutschland

Kationische Polymere und eine Mischung aus kationischen und anionischen wurden als Flockungshilfsmittel benutzt (siehe Tabelle 3.3). Die verwendeten kationischen Polymere (185K, 187K und 655BC) sind Copolymere aus Acrylamid mit steigenden Anteilen eines kationischen Comonomers. Die dadurch in dem Polymer enthaltenen kationischen Gruppen haben in wäßriger Lösung positive Ladungen. Die anionischen Polymere (2440 und A3040L) sind Copolymere von Acrylamid mit zunehmendem Anteil an Acrylat. Sie geben den Polymeren in wäßriger Lösung negative Ladungen und damit anionaktiven Charakter. Die Flockungsmittel wurden so ausgewählt, daß deren elektrostatische Adsorption auf der Quarzoberfläche, die negativ geladen ist, erfolgen kann.

Tabelle 3.4: Standard-Flotationsbedingungen

Parameter	Benutzte Werte
H/D_1	1,0*
pH-Wert	9,0
Trübetemperatur	20 - 23 °C
Feststoffmasseanteil der begasten Trübe (μ_{bt})	20 % ⁺⁺
Trübedichte (ρ_{su})	1,149 g/cm ³ ⁺⁺
Rotordrehzahl (n)	865 min ⁻¹ *
Spezifischer Luftdurchsatz (q_L)	2,2 · 10 ⁻² l Luft/(l Trübe · s)* ⁺⁺
Schaumhöhe (H_{sch})	0,5 und 1,0 cm ⁺⁺
Schaumabzug	bei $t = 8$ min: 0,0 - 0,5; 0,5 - 2,0; und 2,0 - 8,0 min bei $t = 10$ min: 0,0 - 1,0; 1,0 - 3,0; 3,0 - 6,0 und 6,0 - 8,0 min
Schaumabzugsrate	6 min ⁻¹
Konditionierungszeit (t_c)	10 min
Flotationszeit (t)	8,0 und 10 min

*Diese Größen sind bei der Untersuchung des Einflusses der Zellengeometrie variiert worden.

⁺⁺ Diese Größen sind bei der Untersuchung ihres Einflusses variiert worden.

3.1.3 Standard-Versuchsbedingungen

Die Standard-Versuchsbedingungen und den Versuchsablauf gibt Tabelle 3.4 wieder. In der Regel sind jeweils Doppelversuche durchgeführt und deren arithmetische Mittelwerte der Auswertung zugrunde gelegt worden. Um das Trübeniveau konstant zu halten, ist während der Flotationszeit Wasser mit pH 9,0 zugeführt worden. Bei allen Versuchen wurden die Flotationsprodukte gewogen, getrocknet und zurückgewogen. Daraus konnten das Feststoffausbringen und das Wasserausbringen (R_{H_2O}) bestimmt werden. Demineralisiertes Wasser ist bei allen Versuchen benutzt worden. Die Schaumhöhe $H_{sch} = 0,5$ cm ist bei den Untersuchungen zum Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabetrübe und des spezifischen Luftvolumenstroms verwendet worden. Bei anderen Untersuchungen wurde die Schaumhöhe $H_{sch} = 1,0$ cm gewählt. Ausnahme waren die Versuche zum Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe, bei denen beide Schaumhöhen untersucht worden sind. Die niedrigen Schaumhöhen wurde benutzt, weil dadurch die Wirkung des Abreißens von Teilchen aus den Teilchen-

Blase-Aggregaten und der Schaumentwässerung und des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen in die Trübe-Schaum-Grenze untersucht werden kann [37].

3.1.4 Bestimmung des Feststoffausbringens durch Trübemitführung

Die bisher benutzten Methoden zur Bestimmung der Trübemitführung in mechanischen Flotationsapparaten sind nicht als ausreichend zuverlässig zu betrachten. Deshalb ist im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Methode zur Bestimmung der Trübemitführung im Labormaßstab entwickelt worden. Um den Beitrag des Ausbringens hydrophiler Teilchen durch die Trübemitführung und des Ausbringens hydrophobierter Teilchen durch die Heterokoagulation (echte Flotation) am Gesamtausbringen der Flotation getrennt bestimmen zu können, wurde als Versuchsgut eine synthetische Mischung (1:1) eingesetzt. In dieser ist die Teilchengröße der hydrophobierten Teilchen (Fluorit) größer als die der hydrophilen Teilchen (Quarz). Damit kann der Beitrag der Trübemitführung und Heterokoagulation am Gesamtausbringen durch die Siebklassierung der Schaumprodukte bei einer Teilchengröße getrennt bestimmt werden, weil das Ausbringen der groben hydrophobierten Teilchen (Fluoritausbringen, R_{CaF_2}) allein als Ausbringen durch Heterokoagulation betrachtet werden kann. Eine Trübemitführung der Fluoritteilchen kann aufgrund ihrer Dichte und Teilchengröße $>71 \mu\text{m}$ ausgeschlossen werden. Diese neue Methode liefert eindeutigere Informationen und vereinfacht die Bestimmung der Trübemitführung im Vergleich zu den in der Literatur bekannten Methoden [10, 33, 35]. Um durch diese Methode eine quantitative Aussage zu erreichen, sollten die Quarzteilchen unter den verwendeten Flotationsbedingungen nicht flotierbar sein. Auch dürfen sie keine Schlammüberzüge auf den relativ groben Fluoritteilchen bilden. Im diesem Zusammenhang sind spezielle Untersuchungen zur Flotierbarkeit des Quarzes und Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des Versuchsgutes und der Schaumprodukte durchgeführt worden.

Um die Anteile von Trübemitführung und Heterokoagulation im Schwimmprodukt experimentell zu ermitteln, ist von jedem Flotationsprodukt eine repräsentative Probe zur Naßsiebung bei $50 \mu\text{m}$ entnommen worden. Aus diesen Ergebnissen ist der Trübemitführungsfaktor (e_{ij}) berechnet worden. Er stellt für eine Teilchengrößenklasse i und/oder ein Mineral j das Verhältnis von Feststoffausbringen zu Wasserausbringen im Schaumprodukt dar. Das Verhältnis von Quarzausbringen zu Fluoritausbringen wurde berechnet. Es wird vorgeschlagen, dieses zu nutzen, um die Trübemitführung zu beschreiben und zu beurteilen.

Das Wasserausbringen wird durch das Verhältnis zwischen der Wassermasse des Schaumproduktes zur Wassermasse der Trübe in der Flotationszelle in der Flotationszeit t ermittelt. Das Wasserausbringen $R_{\text{H}_2\text{O}}(t_i)$ im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i wird nach folgender

Gleichung berechnet:

$$R_{\text{H}_2\text{O}}(t_i) = [M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sch}}(t_i) / M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_i)] \cdot 100 \quad \text{im \%} \quad (15)$$

$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sch}}(t_i)$ Wassermasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i

$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_i)$ Wassermasse der Trübe in der Flotationszelle nach der Flotationszeit t_i

Zur Berechnung der $M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_i)$ werden die folgenden Bedingungen angenommen:

- Das Trübevolumen in der Zelle bleibt konstant während des Flotationsversuches. Das im Schaumprodukt ausgebrachte Trübewasser wird durch Zugabe neuen Wassers in die Trübe-phase ausgeglichen.
- Die Wassermasse in der Trübe nimmt während des Flotationsversuches zu. Die momentane Wassermasse in der Trübe ist gleich der Summe der Wassermasse in der Trübe bei der Flotationszeit $t = 0 \text{ s}$ ($M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_0)$) und der Wassermasse entsprechend dem ausgebrachten Feststoffvolumen während der Flotationszeit t_i .

Daraus folgt

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_i) = M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{t}}(t_0) + \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left(\sum_{i=0}^n (m_{\text{q}}(t_i)/\rho_{\text{q}} + m_{\text{f}}(t_i)/\rho_{\text{f}}) \right) \quad (16)$$

$m_{\text{q}}(t_i)$ Quarzmasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i (g)

$m_{\text{f}}(t_i)$ Fluoritmasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i (g)

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ Wasserdichte (g/cm^3)

ρ_{q} Quarzdichte (g/cm^3)

ρ_{f} Fluoritdichte (g/cm^3)

3.2 Untersuchungen zur Wirkung der Beeinflussung des Suspensionszustandes

Die Untersuchung zur Beeinflussung des Suspensionszustandes erfolgte durch die Modifizierung der Turbulenzintensität im Bereich oberhalb der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone mittels Anwendung verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme, durch Verwendung von Rosteinbauten und durch die Änderung der Zellengeometrie im Zusammenhang mit der Variation des Leistungseintrags sowie in Kombination mit Rosteinbauten. Weiterhin sollen Untersuchungen zur Feststoffkonzentration in Abhängigkeit von der Zellenhöhe, Turbulenzmessungen mit einem Ultraschall-Doppler-Meßgerät in Ein- und Mehrphasenströmungen in der eingesetzten Flotationszelle dazu beitragen, die Wirkung wichtiger Prozeßparameter (s. Abschnitt 1) und der Beeinflussung des Suspensionszustandes auf die Trübe-mit-führung besser zu verstehen und zu erklären.

3.2.1 Messung des Feststoffkonzentrationsprofils in Abhängigkeit von der Zellenhöhe

Die vertikalen Konzentrationsprofile der feinen Quarzteilchen und der relativ groben Fluoritteilchen sind in zwei unterschiedlichen Meßreihen an vertikalen Positionen in der Standardflotationszelle (FA und FB) aufgenommen worden. Diese Versuche erfolgten im Gleichgewichtszustand und unter stationären Bedingungen. Das heißt, die Feststoffkonzentration in der Flotationszelle blieb konstant, und es wurde kein Schaumprodukt abgezogen. Bei der Messung ist eine konstante Drehzahl von 865 min^{-1} eingestellt worden. Die Drehrichtung des Rotors verlief, von oben betrachtet, entgegen dem Uhrzeigersinn. Die Meßbedingungen gibt Tabelle 3.5 wieder. Alle Messungen liefen unter dem gleichen Reagensregime und den gleichen Bedingungen wie die Standardflotationsversuche ab. Beim Zweiphasensystem fest-flüssig wurde allerdings keine Luft eingeführt. Sie sind mit den Flotationsversuchen unter Einschränkungen vergleichbar. Die Versuchsanordnung ist im Bild 3.4 schematisch dargestellt.

Tabelle 3.5: Meßbedingungen des Feststoffkonzentrationsprofils

Phasensystem	Versuchsgut	Feststoffmasseanteil		Luftvolumenstrom $Q_L \text{ (cm}^3\text{/s)}$	spezifischer Leistungseintrag $P_{bt}/m_{bt} \text{ (W/kg)}$
		$\mu_{su} \text{ (%)}$	$\mu_{bt} \text{ (%)}$		
fest-flüssig	synthetische Mischung von Fluorit und Quarz (1:1)	20	-	ohne	1,80
fest-flüssig	Quarz (Q_2)	10	-	ohne	1,74*
fest-flüssig-gasförmig	Quarz (Q_2)	-	10	71	1,22*

*Diese Werte sind beim gleichen Leistungsbeiwert c_p wie der bei der Trübe in der Zelle mit $\mu_{su} = 20 \text{ %}$ und mit Hilfe des Ansatzes in Tabelle 2.5 (s. Seite 45) berechnet worden.

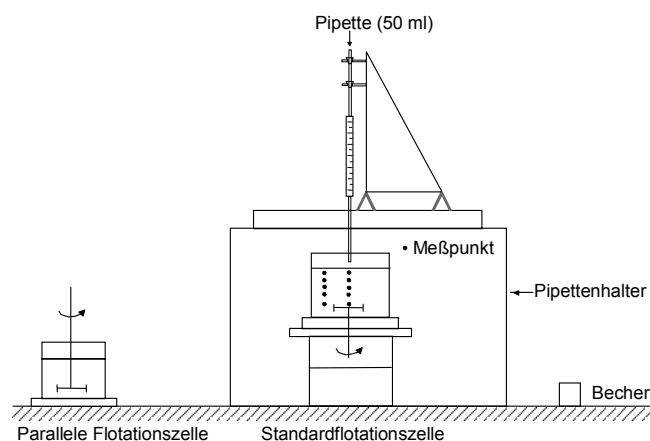


Bild 3.4: Schematische Darstellung des Versuchsstandes zur Messung der Feststoffkonzentration in Abhängigkeit von der Standardzellenhöhe

Bild 3.5 zeigt die Lage der einzelnen Meßpunkte in den Meßreihen FA und FB und das benutzte polare und kartesische Koordinatensystem zur Bestimmung der Positionen der Meßpunkte. Als Koordinatenursprung wurde der Mittelpunkt des Flotationszellenbodens gewählt.

Die x -Achse ist horizontal nach der linken Seite der Flotationszelle gerichtet, während die y -Achse zur Vorderseite der Zelle zeigt. Die z -Achse beginnt am Boden der Zelle und ist vertikal ausgerichtet. Die θ -Winkelkoordinate ist in Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn positiv definiert. Ihr Ursprung ist die x -Achse.

Um die Richtung der Hauptströmungen in jedem Meßpunkt zu bestimmen, wurde im Institut für Fluidmechanik und Fluidenergiemaschinen an der TU Bergakademie Freiberg die zeitliche mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Einphasenströmungen (Wasser mit Fluorit als Streuteilchen) mittels Laser-Doppler-Anemometrie-Meßgerät (LDA) der Fa. DANTEC gemessen. Die Positionierung der Laser-Doppler-Anemometrie-Sonde (LDA-Sonde) gibt ebenfalls Bild 3.5 wieder. Die Meßergebnisse sind in Anlage 2 zusammengefaßt.

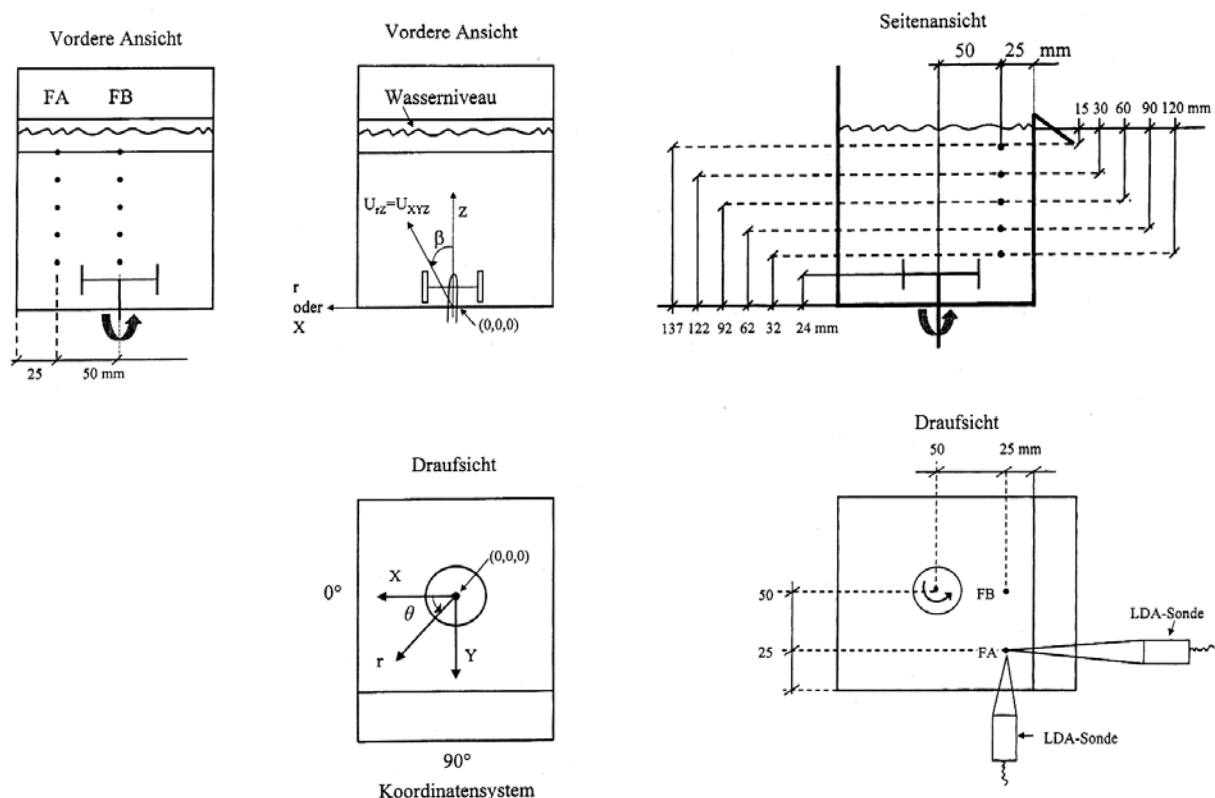


Bild 3.5: Die Koordinaten (im polaren und kartesischen System) der zwei Meßreihen FA und FB und der einzelnen Meßpunkte zur Messung der Feststoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Standardzellenhöhe sowie die Position der LDA-Sonde zur Messung der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten

Die Trübevorbereitung geschah gleichzeitig in der Standardflotationszelle und in einer anderen Flotationszelle mit ähnlicher Geometrie (Volumen der Zelle 3,5 l und gleiches Rotor-Stator-Strombrecher-System - aber von oben angetrieben, s. Bild 3.4). Das Trübevolumen in der Standardzelle, aus der die Trübeproben entnommen wurden, ist während des Versuches konstant gehalten worden, in dem das entnommene Trübevolumen der Standardzelle durch

die Zugabe von Trübeproben aus der zweiten Flotationszelle ausgeglichen wurde. Die Messung der Feststoffkonzentration erfolgte nach Entnahme von Trübe mittels kalibrierter Pipetten (50 ml) mit einem mittleren Öffnungsdurchmesser von 5 mm an den verschiedenen Meßpunkten durch die modifizierte Methode von *Harris u. a.* [197]. Die Pipettenöffnung war dabei gerade nach unten oder in einem Winkel von 90° zur Senkrechten ausgerichtet, um stärker die Hauptrichtungsrichtung zu erfassen. Die Probe ließ sich mittels einer Pipettenakkupumpe aus der Trübe entnehmen. Die Probenentnahme hat ca. 8 s gedauert. Es wurden jeweils Dreifachproben an jedem Meßpunkt entnommen und deren arithmetische Mittelwerte der Auswertung zugrunde gelegt. Ein millimetrisches Papierstreifenband auf dem Rohroberteil der Pipetten vereinfachte die Bestimmung des abgesaugten Probevolumens. Die entnommene Probe wurde in einem Becher bekannter Masse gewogen, getrocknet und noch einmal gewogen. Dadurch konnten der Feststoffgehalt (g/g), die Feststoffkonzentration (g/ml), der Feststoffmasseanteil (%) und Feststoffvolumenanteil für jeden Meßpunkt ermittelt werden. Bei den Versuchen mit synthetischen Mischungen aus Fluorit und Quarz ist eine repräsentative Probe zur Nasssiebung bei 50 µm entnommen worden, um die Konzentration der Feststoffteilchengrößenklassen >50 µm und <50 µm in Abhängigkeit von der Flotationszellenhöhe zu bestimmen und den Suspensionszustand der Quarz- und Fluoritteilchen zu beurteilen.

3.2.2 Modifizierung der Turbulenz in der Trübezone

Um die Wirkung der Änderung der Turbulenzintensität in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone auf den Suspensionszustand und somit auf die Trübe mitführung aufzuklären, wurden die Gestaltung des Prozeßraumes in der Standardflotationszelle verändert: Anwendung unterschiedlicher Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme, Einbauten von Beruhigungsrosten, Änderung der Zellengeometrie in Zusammenhang mit der Variation des Leistungseintrags und in Kombination mit Rosteinbauten.

3.2.2.1 Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme

Bild 3.6 zeigt die eingesetzten Bauarten (A, B, C, D) der Zellen. Sie unterscheiden sich durch die verwendeten Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme. Bauart A hat einen Doppelfingerrotor und vier Strombrecher. Die Blätter des Stators haben einen Anstellwinkel von 60° zur radialen Richtung. Das Rotor-Stator-System der Bauart B wurde bereits im Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Bauart C verfügt über einen Doppelfingerrotor und vier Strombrecher. Bauart D besteht aus einem Einfachfingerrotor und einem Stator mit kleinen, radial ausgerichteten Blättern. Anlage 3 enthält die wichtigsten Abmessungen der Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme der Zellenbau-

art A, C und D. Alle diese Zellenbauarten stimmen in den Werten V_{bt} (3,4 l), D_1 (15,0 cm), H (15,2 cm) und H/D_1 (1,0) mit der Standardflotationszelle (Bauart B) überein.

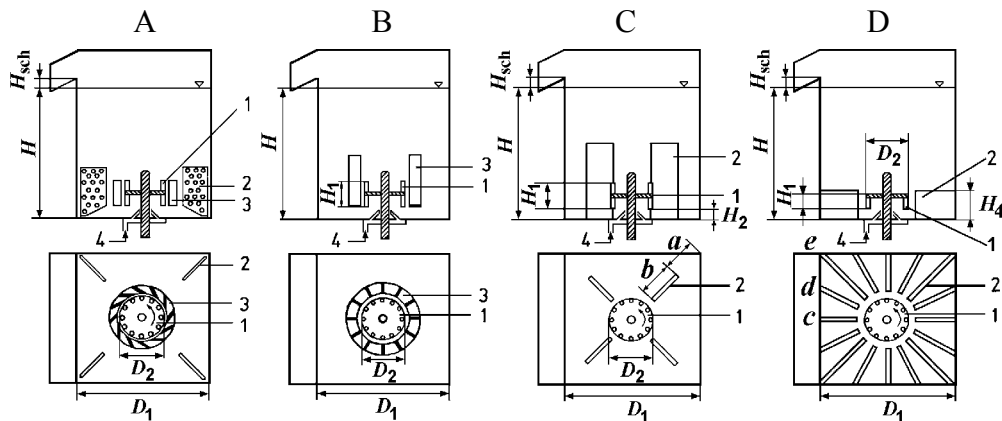


Bild 3.6: Schematische Darstellung der eingesetzten 3,4-l-Flotationszellen, Bauart A, B (Standardzelle), C und D, mit den wichtigsten Abmessungen
(1) Rotor, (2) Strombrecher, (3) Stator und (4) Luftverteiler

3.2.2.2 Rosteinbauten

Durch Einbau rostförmiger Beruhigungseinbauten wurde ihre Wirkung auf die Turbulenzintensität im oberen Trübevolumen direkt unterhalb der Schaumzone und auf die Trübemitführung untersucht. Dazu wurden Rosttypen mit quadratischen Öffnungen in unterschiedlichen Rostpositionen in der Standardflotationszelle (System B) bei konstanter Schaumhöhe von 1,0 cm verwendet. Bild 3.7 zeigt die drei untersuchten Rostpositionen. Einerseits erfolgte die Anordnung oberhalb des Rotor-Stator-Systems B, wie es bei den Standardflotationsversuchen benutzt wurde, um ein ruhiges Trübevolumen direkt unterhalb der Schaumzone zu erzeugen. Bei dieser Positionierung des Rostes war der Abstand der Unterkante des Rostes vom Zellenboden (H_6) gleich 71 mm. Zum anderen wurde der Rost oberhalb der Trübezone angebracht, wobei die Oberkante des Rostes 5 mm über die Trübe-Schaum-Grenze ragte. Dadurch sollte in diesem Bereich die Schwankung infolge der turbulenten Strömung und Zirkulationsströmung vermindert werden. Zum Dritten befand sich der Rost in einer Position, in der der Abstand zwischen der Rostunterkante und der Rotoroberkante (H_3) gleich dem Abstand der Rotorunterkante vom Zellenboden (H_2) war ($H_3 = H_2 = 9$ mm). Diese Rostpositionierung mit einem Rotor-Stator-Strombrecher-System der Bauart C (siehe Bild 3.6) hat nach Untersuchungen von *Bischofberger und Schubert* [92, 96] die besseren Flotationsergebnisse geliefert. Bei dieser Positionierung des Rostes sind die Statorblätter der Zellenbauart B verkürzt, um die Bedingung $H_3 = H_2$ zu erfüllen. Die verwendeten Rosttypen unterscheiden sich durch die Weite D_R sowie Höhe H_R der quadratischen Öffnungen und sind mit den Abkürzungen RA bis RK bezeichnet. Tabelle 3.6 gibt die wichtigsten Abmessungen der eingesetzten Rosttypen wieder.

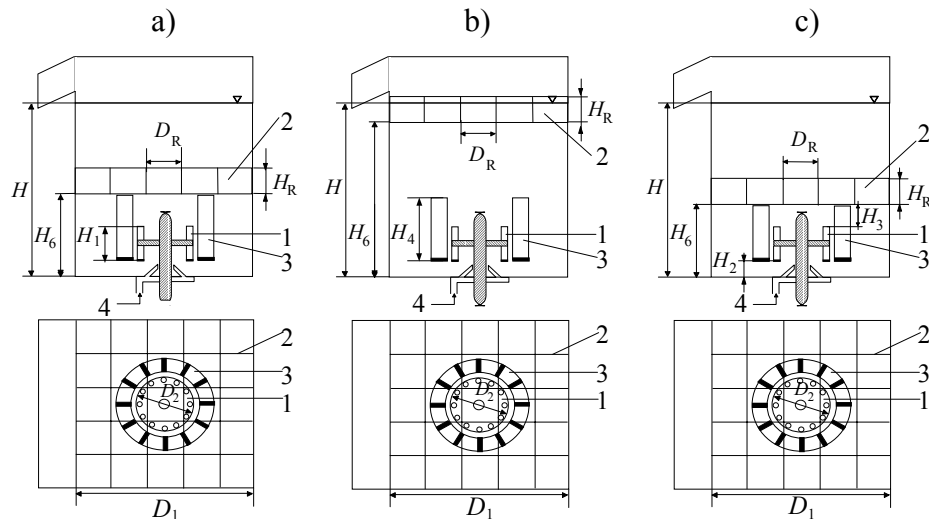


Bild 3.7: Schematische Darstellung der Standardflotationszelle (Zellenbauart B) mit den drei unterschiedlichen Rostpositionen

(1) Rotor, (2) Rost, (3) Stator und (4) Luftverteiler

a) Oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems ($H_6 = 71 \text{ mm}$)

b) Oberkante des Rostes 5 mm über der Trübe-Schaum-Grenze

c) $H_2 = H_3 = 9 \text{ mm}$

Tabelle 3.6: Die wichtigsten Abmessungen und geometrischen Verhältnisse der eingesetzten Rosttypen

Bezeichnung der Rosttypen	Rostöffnungen		geometrische Verhältnisse der quadratischen Rostöffnungen			
	Weite $D_R \text{ (mm)}$	Höhe $H_R \text{ (mm)}$	$H/D_1 = 1,0 \text{ (} D_1 = 150 \text{ mm)}$		$H/D_1 = 2,8 \text{ (} D_1 = 108 \text{ mm)}$	
			D_R/D_1	H_R/D_1	D_R/D_1	H_R/D_1
RA	5,0	15	0,033	0,10	-	-
RB	5,0	30	0,033	0,20	-	-
RC	12,5	15	0,083	0,10	-	-
RD	28,0	10	0,187	0,07	-	-
RE	28,0	15	0,187	0,10	-	-
RF	28,0	30	0,187	0,20	-	-
RG	28,0	50	0,187	0,33	-	-
RH	5,0	50	-	-	0,046	0,46
RI	12,5	30	-	-	0,116	0,28
RJ	12,5	50	-	-	0,116	0,46
RK	8,0	15	0,053	0,10	-	-

3.2.2.3 Zellengeometrie

Die Änderung der Geometrie der Zellen durch die Vergrößerung der Höhe des Prozeßraumes und damit auch Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses wurde vorgenommen, weil dadurch unter Umständen eine Reduzierung der Turbulenzintensität im Bereich der Trübe-Phase unmittelbar unterhalb der Schaumphase begünstigt werden kann. Um den Einfluß der Zellengeometrie auf die Trübe-mitführung zu untersuchen, wurden zwei Versuchsreihen mit Änderung des H/D_1 -Verhältnisses durchgeführt:

a) bei konstanter Zellenquerschnittsfläche A_Q und konstantem begasten Trübevolumen, konstantem spezifischen Leistungseintrag ($P_{bt}/m_{bt} = 1,3 \pm 0,1 \text{ W/kg}$) sowie konstanter Luftströmungs-Zahl

$$c_L = Q_L / n \cdot D_2^3 \quad (c_L = 0,029; Q_L - \text{Luftvolumenstrom; } n - \text{Rotordrehzahl; } D_2 - \text{Rotordurchmesser});$$

b) mit konstantem Zellenvolumen V_{bt} , konstanter Luftströmungs-Zahl c_L sowie konstanter Rotordrehzahl n .

Das Rotor-Stator-System Typ B wurde bei beiden Versuchsreihen eingesetzt. Bild 3.8 zeigt die Flotationszellen mit konstanter Querschnittsfläche sowie gleichem Rotordurchmesser und verändertem Verhältnis H/D_1 sowie unterschiedlichem begasten Trübevolumen. Die Flotationszellen mit konstantem begasten Trübevolumen und geänderten Verhältnis H/D_1 , Rotordurchmesser und variierter Querschnittsfläche sind im Bild 3.9 dargestellt. Die Zellen mit konstantem V_{bt} unterscheiden sich durch unterschiedliche Rotordurchmesser D_2 , Kantenlängen D_1 der Zellen und relative Einbauhöhen H_{2m}/D_1 des Rotors im Vergleich zu den Zellen mit konstanter Querschnittsfläche A_Q . Die Füllhöhe H der Zellen im begasten Zustand wurde bei beiden Versuchsreihen variiert. In Tabelle 3.7 sind die Hauptabmessungen der benutzten Zellen zusammengestellt. Die Versuchsbedingungen bei veränderter Geometrie der Zellen gibt Tabelle 3.8 wieder.

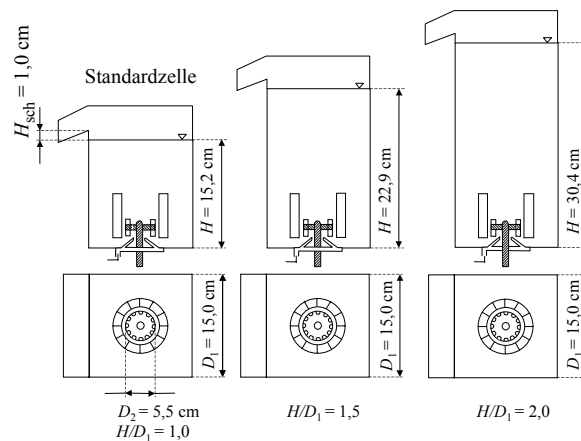


Bild 3.8: Schematische Darstellung der Flotationszellen mit konstanter Querschnittsfläche

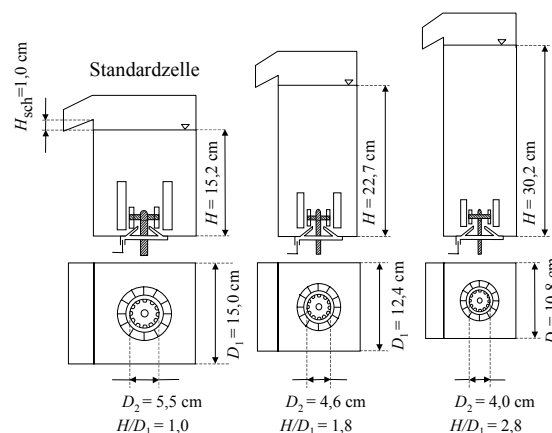


Bild 3.9: Schematische Darstellung der Flotationszellen mit konstantem begasten Trübevolumen

Der Leistungseintrag wurde als Differenz zwischen der Leistung beim Betrieb der Flotationszelle mit Trübe sowie Luftzuführung und bei Leerlauf bestimmt. Die Messung des Leistungs-

eintrags des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems im Standardflotationsapparat lieferte bei gleichen Versuchsbedingungen keine reproduzierbaren Ergebnisse. Erklärungen hierfür sind: Energieverluste bei der Kraftübertragung vom Antriebskeilriemen zum Rotor, Schwankungen der Netzspannung und unterschiedliche Reibung im Gehäuse der Kugellager der Achswelle auf Grund des Auslaufens von Trübe infolge eines undichten Wellenrings. Deshalb wurde zur Messung des Leistungseintrags des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems schließlich eine modifizierte Anordnung des Rotors, bei der er von oben angetrieben wurde, eingesetzt. Der Motor ist an einen Konstantspannungshalter (WS-10, Fa. Wandel und Goltermann) angeschlossen worden, um die Schwankungen der Netzspannung auszugleichen. Die Messung der elektrischen Leistung erfolgte automatisch durch einen digitalen Leistungsmesser (WT 130, Fa. Yokogawa).

Tabelle 3.7: Hauptabmessungen der Zellen unterschiedlicher Geometrie

Abmessungen und Geometrie	Zellen mit konstanter Querschnittsfläche ($A_Q = 225 \text{ cm}^2$)			Zellen mit konstantem Volumen ($V_{bt} = 3,45 \pm 0,05 \text{ l}$)		
H/D_1	1,0	1,5	3,0	1,0	1,8	2,8
Kantenlänge der Zelle D_1 (cm)	15,0	15,0	15,0	15,0	12,5	10,8
Rotordurchmesser D_2 (cm)	5,5	5,5	5,5	5,5	4,6	4,0
Füllhöhe im begasten Zustand H (cm)	15,20	22,90	30,45	15,20	22,70	30,25
Einbauhöhe des Rotors H_{2m} (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6
Relative Einbauhöhe des Rotors H_{2m}/D_1 (cm)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21	0,24
Volumen der begasten Trübe V_{bt} (l)	3,400	5,095	6,800	3,400	3,450	3,490

Konstante Schaumhöhe $H_{sch} = 1,0 \text{ cm}$ und konstantes Durchmesser Verhältnis $D_2/D_1 = 0,37$

Tabelle 3.8a: Flotationsbedingungen bei unterschiedlicher Zellengeometrie (konstante Luftströmungszahl c_L und konstanter spezifischer Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt})

Parameter	Zellen mit konstanter Querschnittsfläche ($A_Q = 225 \text{ cm}^2$)			Zellen mit konstantem Volumen ($V_{bt} = 3,45 \pm 0,05 \text{ l}$)		
H/D_1	1,0	1,5	3,0	1,0	1,8	2,8
Masse der begasten Trübe m_{bt} (kg)	3,792	5,649	7,356	3,792	3,806	3,782
Trübedichte der beg. Trübe ρ_{bt} (g/cm ³)	1,1155	1,1087	1,0818	1,1155	1,1032	1,0837
Rotordrehzahl n (min ⁻¹)	865	900	1090	865	1165	1471
Rotorumfangsgeschwindigkeit u_R (cm/s)	249	285	314	249	280	308
Luftvolumenstrom Q_L (l/s)	0,071	0,082	0,090	0,071	0,056	0,047

$c_L = 0,029$, $P_{bt}/m_{bt} = 1,3 \pm 0,1 \text{ W/kg}$ und $H_{sch} = 1,0 \text{ cm}$

Tabelle 3.8b: Flotationsbedingungen bei unterschiedlicher Zellengeometrie (konstante Strömungszahl c_L sowie Rotordrehzahl n und abnehmender spezifischer Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt})

Parameter	Zellen mit konstantem Volumen ($V_{bt} = 3,45 \pm 0,05 \text{ l}$)		
H/D_1	1,0	1,8	2,8
Masse der begasten Trübe m_{bt} (kg)	3,792	3,931	3,982
Trübedichte der beg. Trübe ρ_{bt} (g/cm ³)	1,1155	1,1395	1,1408
Rotorumfangsgeschwindigkeit u_R (cm/s)	249	208	181
Luftvolumenstrom Q_L (l/s)	0,071	0,042	0,028
Spez. Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt} (W/kg)	1,22	0,59	0,39

$c_L = 0,029$, $n = 865 \text{ min}^{-1}$ und $H_{sch} = 1,0 \text{ cm}$

3.2.2.4 Synergetische Wirkung der Zellengeometrie und Rosteinbauten

Die synergetische Wirkung der Änderung der Zellengeometrie und Anwendung der Rosteinbauten auf die Trübe mitführung ist bei der Zelle mit einem Verhältnis H/D_1 von 2,8 und konstanter Luftströmungs-Zahl ($c_L = 0,080$) und konstantem spezifischen Leistungseintrag ($P_{bt}/m_{bt} = 0,36 \pm 0,02$ W/kg) untersucht worden. Jedoch ist die Luftströmungs-Zahl höher und der spezifische Leistungseintrag konstant im Vergleich zu Versuchen mit der gleichen Zelle, aber ohne Rosteinbauten. Die Rotordrehzahl ($n = 865 \text{ min}^{-1}$), Rotorumfangsgeschwindigkeit ($u_R = 181 \text{ cm/s}$), der Luftvolumenstrom ($Q_L = 0,074 \text{ l/s}$) und die Schaumhöhe ($H_{sch} = 1,0 \text{ cm}$) wurden konstant gehalten. Bei diesen Untersuchungen wurde nur die Rostposition an der Trübe-Schaum-Grenze verwendet. Als Rosttypen sind RH, RI und RJ eingesetzt worden.

3.2.2.5 Turbulenzmessung

Um den Einfluß von Veränderungen der Zellengeometrie auf die Turbulenzintensität – insbesondere unter der Schaumzone – zu ermitteln, sind Turbulenzmessungen in ausgewählten Zellen durchgeführt worden. Diese Untersuchungen sollen auch dazu beitragen, die Wirkungen der Reduzierung der Turbulenz auf die Trübe mitführung besser zu verstehen und zu erklären. Die eingesetzten Zellen haben ein Verhältnis- H/D_1 von 1,0 und 2,8. Die Messung der Turbulenz erfolgte unter den gleichen Versuchsbedingungen, bei denen mit diesen Zellen optimale Trennungsergebnisse erzielt wurden. Diese Turbulenzmessungen sind im Gleichgewichtszustand und unter stationären Bedingungen durchgeführt worden. Das heißt, die Feststoffkonzentration in der Flotationszelle wurde konstant gehalten, und es wurde kein Schaumprodukt abgezogen. Die Tabelle 3.9 stellt die verwendeten Untersuchungsbedingungen dar.

Tabelle 3.9: Turbulenzmessungsbedingungen

Flotationszelle** H/D_1 -Verhältnis	Phasenströmungen	Phasen	Schäumer*	Feststoffmasseanteil	
				$\mu_{su}(\%)$	$\mu_{bt}(\%)$
1,0	Einphasenströmungen	destilliertes Wasser mit Streuteilchen (Fluorit)	ohne	-	-
	Zweiphasenströmungen flüssig-gasförmig	destilliertes Wasser mit Streuteilchen und Luftblasen	ohne	-	-
			mit	-	-
1,0 und 2,8	Zweiphasenströmungen fest-flüssig	destilliertes Wasser und synthetische Mischung aus Fluorit und Quarz Q_2 (1:1)	mit	2,9	-
	Dreiphasenströmungen fest-flüssig-gasförmig	destilliertes Wasser, synthetische Mischung aus Fluorit und Quarz Q_2 (1:1) sowie Luftblasen	mit	-	2,9

*Reagensregime und pH gleich wie die Standardflotationsversuche (außer Schäumerzugabe); ** Bei beiden Zellen wurde das Rotor-Stator-System B verwendet und die Rotordrehzahl blieb konstant ($n = 865 \text{ min}^{-1}$)

Es gibt verschiedene Methoden zur Turbulenzmessung [16, 17, 183 bis 193, 216 bis 220]. In

mechanischen Flotationsapparaten (Mehrphasensystem) kann nach bisherigen Erfahrungen jedoch nur die Piezosonde [16, 17, 183 bis 187, 191, 192] genutzt werden. Die in Mehrphasenströmungen auftretenden Beanspruchungen und die Undurchsichtigkeit des Fluids schließen den Einsatz von Hitzdraht- und Heißfilmsonden bzw. Laser-Doppler-Anemometrie aus [217, 218]. Die Laser-Speckle-Velocimetrie (LSV) [193, 216] ist nur für dünne fest-flüssig- und gasförmig-flüssig-Zweiphasensysteme geeignet. Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit eine neuartige Meßmethode benutzt. Die Ultraschall-Doppler-Anemometrie gestattet innerhalb weniger ms die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im undurchsichtigen Fluid, fluidberührungslos (ungestörte Strömungen) und ohne Kalibrierung des Meßgerätes. Diese Methode wurde nach bisherigem Kenntnisstand lediglich bei Messungen in Rührwerken [218] und Einphasensystemen sowie flüssig-flüssig- bzw. flüssig-fest-Zweiphasensystemen angewandt [218 bis 220].

Das Meßprinzip der Ultraschall-Doppler-Anemometrie beruht im wesentlichen auf das Detektieren von Dopplerverschiebungen, die von im Fluid befindlichen und von der Strömung möglichst schlupffrei mitgeführten Streuteilchen erzeugt werden. Von einem Ultraschallsender wird ein fokussierter Schallstrahl ausgesandt und nach dem Reflektieren an den Streuteilchen dort wieder empfangen und ausgewertet. Die Bestimmung der Meßposition s , bei welcher das Streuteilchen das Meßvolumen passierte, kann aus der Zeit zwischen dem ausgesandten Schallimpuls und dem empfangenen Streusignal Δt bestimmt werden: $s = 0,5 \cdot c \cdot \Delta t$, wobei c die Schallgeschwindigkeit im betreffenden Fluid ist. Die Frequenz der gestreuten Ultraschallwelle (Dopplerfrequenz f_D) unterscheidet sich von der Grundfrequenz des ursprünglich emittierten Ultraschallsignals (f_0). Die Geschwindigkeitskomponente der entsprechenden Streuteilchen entlang des ausgesandten Ultraschallstrahls v_s läßt sich gemäß Gleichung (17) bestimmen [218, 219, 220, 222].

$$v_s = c \cdot \frac{f_D}{2 \cdot f_0} \quad (17)$$

Das Vorzeichen der gemessenen Frequenzverschiebung gibt Auskunft über die Bewegungsrichtung des Teilchens relativ zur Ultraschallquelle.

Die maximale Meßlänge L_{\max} (Eindringtiefe) ist durch die Pulsfolgenfrequenz f_{prf} begrenzt:

$$L_{\max} = c / (2 \cdot f_{\text{prf}}) \quad (18)$$

Die maximal detektierbare Dopplerfrequenz $f_{D\max}$ und damit auch die maximal meßbare Geschwindigkeit v_{\max} (s. Gl. 17) sind ebenfalls von der Pulsfolgenfrequenz abhängig:

$$f_{D\max} < f_{\text{prf}} / 2 \quad \text{bzw.} \quad v_{\max} < (c \cdot f_{\text{prf}}) / (4 \cdot f_0) \quad (19)$$

Aus den Gleichungen (18) und (19) können die Bedingungen zur Meßgrenze dieses Meßverfahrens abgeleitet werden. Große Eindringtiefen lassen sich nur auf Kosten der maximal meßbaren Geschwindigkeit erzielen:

$$L_{\max} \cdot v_{\max} < c^2 / (8 \cdot f_0) \quad (20)$$

Die Messungen der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und der mittleren Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit sind an unterschiedlichen Meßorten der eingesetzten Flotationszelle mittels Ultraschall-Geschwindigkeits-Monitor-Meßgerät (UVP-X-3; Ultraschall-Doppler-Anemometrie) der Firma MET-FLOW S.A., Lausanne durchgeführt worden. Dieses Meßgerät erlaubt die Messung der Fluidgeschwindigkeit an 128 Punkten auf dem Meßstrahl. Dabei werden pro Meßzyklus 1024 Profile aufgenommen. Das Gerät arbeitete mit drei unterschiedlichen Grundfrequenzen f_0 (2 MHz, 4 MHz und 8 MHz). Der Durchmesser des fokussierten Ultraschallstrahles betrug 5 mm ($f_0 = 8$ und 4 MHz) und 8 mm ($f_0 = 2$ MHz). Die örtliche Auflösung in Sensorrichtung kann mit 0,75 mm beziffert werden und ist abhängig von der Meßlage und der Anzahl der Meßkanäle [219]. Am Gerät selbst können verschiedene Strahllängen eingestellt werden, wodurch sich gewisse Grenzen hinsichtlich der maximal meßbaren Geschwindigkeit bzw. der Auflösung der Geschwindigkeitswerte ergeben, wie Tabelle 3.10 zeigt.

Tabelle 3.10: Eindringtiefe und maximal meßbare Geschwindigkeit des Meßgerätes UVP-X-3 bezogen auf Wasser

maximale Eindringtiefe	f_0 (MHz)					
	2		4		8	
	$\bar{u}_{i,\max}$ (mm/s)	$\Delta\bar{u}_i$ (mm/s)	$\bar{u}_{i,\max}$ (mm/s)	$\Delta\bar{u}_i$ (mm/s)	$\bar{u}_{i,\max}$ (mm/s)	$\Delta\bar{u}_i$ (mm/s)
104	1316	10.4	658	5.2	329	2.6
755	181	1.4	91	0.7	45	0.4

Schallgeschwindigkeit im Wasser $c = 1480$ m/s; $\bar{u}_{i,\max}$ maximal meßbare Geschwindigkeit;
 $\Delta\bar{u}_i$ Auflösung der Geschwindigkeitswerte

Bei den Messungen der x - und y -Komponenten der Strömungsgeschwindigkeit wird die Sonde seitlich und vorn in der Zelle durch Wandlöcher, welche den gleichen Durchmesser wie die Sonde haben, in den Ebenen der Meßpunkte in direkten Kontakt mit der Trübe gebracht. Bei Messung der z -Komponente der Strömungsgeschwindigkeit wird die Sonde 10 mm tief in die Trübe eingetaucht und durch eine Öffnung in einem PVC-Block mit einer Schraube festgehalten. Dieser PVC-Block kann durch einen Stab, der als Schiene benutzt wird und an beiden Seiten der Zelle fixiert ist, bei den entsprechenden x - und y -Koordinaten des jeweiligen Meßortes positioniert werden. Bei der Messung verlief die Drehrichtung des Rotors, von oben betrachtet, entgegen dem Uhrzeigersinn.

Bild 3.10 zeigt die Positionen der einzelnen Meßpunkte in kartesischen Koordinaten. Als Koordinatenursprung wurde der Mittelpunkt des Flotationszellenbodens gewählt. Die x -Achse ist zur Vorderseite der Flotationszelle und die y -Achse zur rechten Seite der Zelle gerichtet. Die x -Achse beginnt am Boden der Zelle. Die θ -Winkelkoordinate ist in Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn positiv definiert. Ihr Ursprung ist die x -Achse. Der Winkel β zwischen der z -Achse und der Resultierenden variierte von 0° bis 180° .

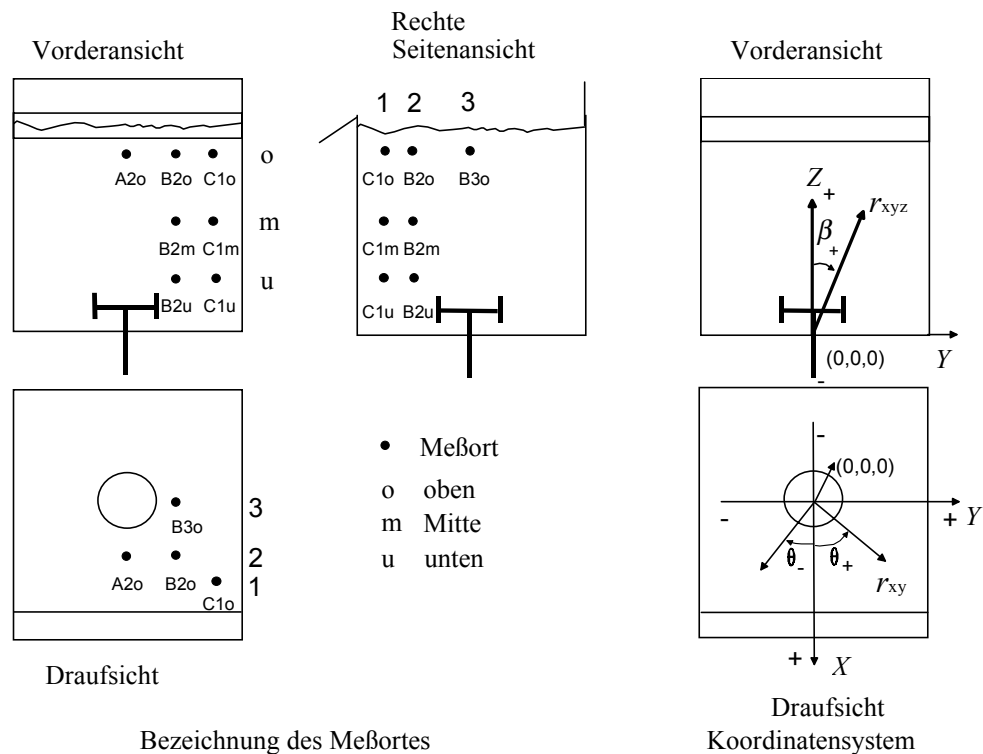


Bild 3.10: Schematische Darstellung der Positionen der einzelnen Meßorte (im kartesischen Koordinatensystem) zur Messung der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten und der mittleren Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeiten

Tabelle 3.11: Koordinaten der Meßorte für die Zellen mit einem Verhältnis- H/D_1 von 1,0 und 2,8

Meßort	Zelle mit $H/D_1 = 1,0$			Zelle mit $H/D_1 = 2,8$		
	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
A2o	37,5	0,0	132,0	27,0	0,0	282,5
B3o	0,0	37,5	132,0	0,0	37,5	282,5
B2o	37,5	37,5	132,0	27,0	27,0	282,5
B2m	37,5	37,5	76,0	27,0	27,0	151,2
B2u	37,5	37,5	30,0	39,0	39,0	30,0
C1o	65,0	65,0	132,0	44,0	44,0	282,5
C1m	65,0	65,0	76,0	44,0	44,0	151,2
C1u	65,0	65,0	30,0	44,0	44,0	30,0

Die kartesischen Koordinaten der Meßorte sind in Tabelle 3.11 zusammengestellt. Die Me-

Boorte befinden sich in drei unterschiedlichen horizontalen Ebenen. Die erste Ebene bildet der obere Bereich der Trübezzone 20 mm unterhalb der Trübe-Schaum-Grenze (o), die andere befindet sich in der Mitte der Füllhöhe der Zelle (m) und die unterste (u) im unteren Bereich der Trübezzone, 5,0 mm oberhalb der Rotorscheibe. Die Meßorte wurden nur in einem Viertel der Meßzelle angebracht. Die anderen drei Viertel werden aus Gründen der Rotationssymmetrie als identisch angenommen.

Bei der Bestimmung der Richtung der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit ist ein kartesisches Koordinatensystem mit gleicher Orientierung wie zur Beschreibung des Meßortes sowie der Meßort als Ursprung des Koordinatensystems verwendet worden. Aus der gemessenen mittleren zeitlichen Strömungsgeschwindigkeit (\bar{u}_i) und den mittleren Effektivwerten der Schwankungsgeschwindigkeit ($\sqrt{u_i'^2}$) wurden die dimensionslosen mittleren Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit, bezogen auf die Rotorumfangsgeschwindigkeit (u_R), berechnet.

3.3 Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen

Untersuchungen über den Einfluß der Flockung der feinsten hydrophilen Quarzteilchen wurden durchgeführt, um diese Möglichkeit der Beeinflussung des Suspensionszustandes und ihre Wirkung auf die Trübemitführung zu bewerten sowie die Möglichkeit ihrer Nutzung zur Steuerung und Reduzierung der Trübemitführung in mechanischen Flotationsapparaten zu beurteilen.

3.3.1 Beurteilung des Flockungszustandes

Es werden in der Literatur verschiedene Parameter, wie die Trübung der geklärten Flüssigkeit, der Anteil an geflockter Masse, die Absetzrate, das sedimentierte Volumen, die Filtrierungsrate, Flockengröße und Größenverteilung genutzt, um die Effektivität (Rate und Grad der Flockung) und das Optimum der Dosierung des Polymers zu ermitteln. Als geeignete Meßmethoden haben sich rheologische Tests, mikroskopische Betrachtungen, photometrische Messungen, Partikelgrößenanalyse, Zeta-Potential-Messungen und Absetzversuche erwiesen [207, 211, 212, 215, 223, 224, 226]. Die zwei letztgenannten Meßmethoden wurden im Rahmen dieser Arbeit angewandt, um den Flockungszustand der Quarzsuspension zu bewerten.

3.3.1.1 Absetzversuche mit den Quarzsuspensionen

Bei diesen Untersuchungen sollten die besten Versuchsbedingungen für die Quarzflockung mit den ausgewählten Polymeren bei der Flotation gefunden werden. Dabei ist der Einfluß der Wirkung der hochturbulenten hydrodynamischen Bedingungen in der eingesetzten Stan-

Standardflotationszelle ($H/D_1 = 1,0$) und der folgenden experimentellen Parameter auf die Absetzgeschwindigkeit der Quarzflocken untersucht worden: Polymer (Typen und Zugabe), Durchmischung der Polymere (getrennte oder gemischte Zugabe der kationischen und anionischen Polymere), Anzahl der Dosierungen (1 mal oder 3 mal), Mischungsverhältnis von kationischen und anionischen Polymeren (3:1, 5:1, 10:1) und Feststoffmasseanteil in der Quarzsuspension (5 % und 10 %).

Die Absetzgeschwindigkeit der Quarzflocken (Teilchenstruktur) ist unabhängig von Größe und Dichte der Flocken und nur von der lokalen Feststoffkonzentration abhängig, weil der Absetzversuch unter den Bedingungen der Sedimentationszone stattfindet. Deshalb handelt es sich hierbei um die Durchströmung einer Teilchenstruktur. Somit läßt sich aus der Analyse des entwickelten Durchströmungsmodells ableiten, daß die Absetzgeschwindigkeit nur durch die Änderung der inneren Geometrie der Teilchenstruktur (Flocken), d. h. der Flockenporosität, der Flockenporengrößen- und der -porenformverteilung sowie des bezogenen Druckgefälles ($\Delta p/l$) beeinflußt werden kann [181, 206, 208]. Die Flockenporosität ist weiterhin entscheidend für die Flockenfestigkeit und das Sedimentvolumen nach dem Absetzvorgang [211]. Wegen der Berechnungsschwierigkeit der genannten Modellparameter ist die Absetzgeschwindigkeit nur experimentell zu bestimmen [181, 206, 208].

Zur Durchführung der Standardabsetzversuche wurde die Quarzsuspension in einem 2000 ml Becherglas (Durchmesser 15 cm) durch Zugabe der Quarzprobe in demineralisiertes Wasser (300 ml) vorbereitet und mit einem mechanischen Rührwerk mit Drehzahlmesser der Firma IKA LABORTECHNIK (Rotor mit 2 Blättern: $D_2 = 6$ cm und $H_1 = 1,5$ cm) bei einer Rotordrehzahl von 300 min^{-1} über 2 min agitiert. Danach ist der pH-Wert von 9,0 der Quarzsuspension mit Na_3CO_3 und HCl eingestellt worden. Nachfolgend wurde Natriumsilikat (250 g/t) eingegeben und über 2 min einwirken gelassen. Dann erfolgte die Zugabe der vorgesehenen Menge der Polymerlösung durch Pipettierung und nach 1 min Polymereinwirkung die Reduzierung der Rotordrehzahl auf 200 min^{-1} . Anschließend wurde die Quarzsuspension noch eine weitere Minute konditioniert. Bei gestufter Dosierung ist nach jeder Zugabe der Teilmenge die Konditionierungszeit von jeweils 1 Minute eingehalten worden. Nachher wurde die geflockte Quarzsuspension in einen Meßzylinder mit einem Fassungsvermögen von 500 ml gegeben. Der Meßzylinder wurde dann mit einem Gummistopfen dicht verschlossen und 20 mal durch eine definierte Kippbewegung geschüttelt. Abschließend erfolgte die Ermittlung der Absetzgeschwindigkeit der Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone.

Bei der Untersuchung des Einflusses turbulenter Bedingungen in der Standardflotationszelle ($n = 865 \text{ min}^{-1}$ und $Re_{D_2} = 3,26 \cdot 10^4$) erfolgte die Vorbereitung, Konditionierung und Flockung

wie bei den Standardabsetzversuchen. Danach wurde die geflockte Quarksuspension in die Flotationszelle gegeben. Nach 2 min und 20 min ist die Quarksuspension durch einen Schlauch direkt in den Meßzylinder abgesaugt und der Absetzversuch durchgeführt worden.

3.3.1.2 Zeta-Potential-Messungen

Die Zeta-Potential-Messungen in vorliegender Arbeit dienten zur Bestimmung der Ladung der Quarzteilchen und Fluoritteilchen unter Flotationsbedingungen und zur Aufklärung ihrer Rolle beim Mechanismus der Polymeradsorption auf der Quarzoberfläche und bei der Bildung von Schlammüberzügen des Quarzes auf dem Fluorit. Es muß jedoch kritisch angemerkt werden, daß aus dem Zeta-Potential nicht eindeutig rückgeschlossen werden kann, ob die Feststoffteilchen in einer Suspension dispergiert oder agglomeriert sind. Einige generelle Aussagen sind aber nach *Riddick* (in [227, S. 66]) möglich. Aufgrund seiner Erfahrungen mit stabilisierten Suspensionen gibt der Autor Zeta-Potential-Bereiche für Dispergierung und Flockung an (s. Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12: Zeta-Potential-Bereiche für Dispergierung und Flockung (nach [227])

Stabilitätsbezeichnung	Zeta-Potential (mV)
Obergrenze der Dispergierung	+60 ... +80
Obere Grenze der Ausflockung	+3 ... +5
Maximale Ausflockung	-9 ... +3
Untere Grenze der Ausflockung	-10 ... -15
Obere Grenze schwacher Dispergierung im elektronegativen Potentialbereich	-16 ... -30
Mäßige Stabilität	-31 ... -40
Relativ gute Stabilität	-41 ... -60
Sehr gute Stabilität	-61 ... -80
Extrem gute Stabilität	-81 ... -100

Eine Übersicht zum Entstehen der Oberflächenladung und des Oberflächenpotentials von mineralischen Feststoffen, zum Begriff Zeta-Potential und zu den Methoden der Zeta-Potential-Messung wird von *Schubert* [1, 206] gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Zeta-Potential-Messung durch eine modifizierte Meßmethode der Elektrophorese (elektroakustische Methode), die die Wechselstromelektrophorese nutzt, um das Zeta-Potential in höher konzentrierten Dispersionen zu messen. Hierbei wird in Abhängigkeit von dem angelegten elektrischen Wechselfeld, die elektrokinetische Schallamplitude (Elektrokinetik Sonic Amplitude oder ESA) gemessen, welche durch die von diesem Feld induzierte oszillierende Bewegung der dispergierten Teilchen erzeugt wird [228]. Das Meßgerät ESA-8000 der Firma Matec Applied Sciences wandelt diese Meßsignale in die

elektrophoretische Mobilität und das Zeta-Potential um [229]. Diese Methode hat den Vorteil, daß das Zeta-Potential der Quarz- und Fluoritteilchen bei gleichen Bedingungen wie bei den Standardflotationsversuchen ohne Modifizierung der Teilchengrößenverteilung und des Feststoffmasseanteils sowie unter turbulenten Bedingungen gemessen werden kann. Damit kann diese Messung das elektrokinetische Verhalten der Teilchen in der realen Suspension gut beschreiben und ist nahezu übertragbar. Bei Zeta-Potential-Messungen der Quarz- und Fluoritteilchen kamen als Reagenzien NaCl als indifferenten Elektrolyt (10^{-3} mol/l), HCl und Na_2CO_3 als pH-Regler, Natriumsilikat als Dispergiermittel (250 g/t) und Natriumoleat als Fluoritsammler (200 g/t) zum Einsatz. Weiterhin ist unter dem Einfluß der eingesetzten Polymere das Zeta-Potential der Quarzteilchen bei Zugabemengen von 10,5 mg/l und 23,0 mg/l gemessen worden. Bei allen Messungen ist demineralisiertes Wasser benutzt worden.

3.3.2 Flotation mit geflocktem Quarz

Die optimalen Versuchsbedingungen für die Quarzflockung sind durch Absetzversuche im 500 ml Meßzylinder bestimmt worden. Die Versuchsbedingungen für die Quarzflockung bei der Flotation gibt Tabelle 3.13 wieder. Hierbei wurde die Quarzsuspension in einem 2000 ml Becherglas (Durchmesser von 15 cm) mit Doppelfingerrotor ($D_2 = 6$ cm und $H_1 = 3,4$ cm) getrennt konditioniert und geflockt ($t_c = 8$ min, $n = 300 \text{ min}^{-1}$, Natriumsilikat (250 g/t) und Polymer). Parallel dazu erfolgte die Konditionierung der Fluoritsuspension mit den Flotationsreagenzien in der Standardflotationszelle bei pH 9,0. Anschließend wurde die Quarzsuspension zugegeben und die Mischung (Feststoffmasseanteil in der begasten Trübe $\mu_{bt} = 20$ %) flotiert. Bei allen diesen Flotationsversuchen ist die Schaumhöhe konstant geblieben ($H_{sch} = 1,0$ cm).

Tabelle 3.13: Flockungsversuchsbedingungen

Polymere	Zugabe (mg/l)*	Mischungsverhältnis	Durchmischung	Dosierung
185K	11,5 und 23,0		Getrennte Zugabe der Lösung von kationischen und anionischen Polymeren	Dosierung nach 3 unterschiedlichen Zeiten t_c (jeweils 1/3 der Zugabemenge)
187K	11,5 und 23,0			
655BC	11,5; 23,0 und 46,0			
185K + 2440	11,5; 23,0 und 46,0	10:1 und 3:1 ⁺⁺		
185K + A3040L	23,0	10:1		
187K + 2440	11,5 und 23,0	10:1		
187K + A3040L	11,5 und 23,0	10:1		

*Anwendungskonzentration der Polymere im Massenbruch: 0,05 %;

⁺⁺ Nur bei den Versuchen zum Einfluß des Feststoffmasseanteils verwendet

4 Ergebnisse und Diskussion

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse der Präzisierung der entwickelten Methode zur Bestimmung der Trübe mitführung und des Einflusses einiger wichtiger Prozeßparameter, der Modifizierung des Suspensionszustandes und der Modifizierung des Flockungszustandes der hydrophilen Teilchen auf die Trübe mitführung sowie ihre Reduzierung vorgestellt und erörtert.

4.1 Methodische Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung der Trübe mitführung

Die neu entwickelte Methode zur experimentellen Bestimmung der Trübe mitführung in mechanischen Laborflotationsapparaten liefert quantitative Aussagen, wenn der Quarz nur aufgrund von Trübe mitführung im Schaumprodukt ausgebracht wird. Dies schließt auch das Fehlen von sogenannten Schlammüberzügen feinsten Quarzteilchen auf dem Fluorit aus. Deshalb wurde die Flotierbarkeit des Quarzes bei unterschiedlicher Zellengeometrie unter gleichem Reagensregime und analogen Flotationsbedingungen wie bei den Standardversuchen untersucht. Durch Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen des Versuchsgutes und der Schaumprodukte wurde geprüft, ob ein Quarzausbringen durch Schlammüberzüge erfolgt. Diese Versuche waren erforderlich, um die neu entwickelte Methode zur getrennten Bestimmung des Feststoffausbringens durch Trübe mitführung und durch Heterokoagulation präzisieren zu können.

Tabelle 4.1: Flotierbarkeit des Quarzes bei verschiedenen Flotationszellengeometrien (nur Quarz als Aufgabegut)

Flotationszelle		Luftvolumenstrom O_L (cm ³ /s)	Leerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Schaumprodukt	
Bauprinzip	H/D_1			R_m (%)	R_{H_2O} (%)
mit konstanter Querschnittsfläche	1,0	70	0,31	$0,130 \pm 0,008$	$0,32 \pm 0,01$
	1,5	106	0,47	$0,07 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,02$
	2,0	141	0,63	$0,08 \pm 0,03$	$0,18 \pm 0,01$
mit konstantem Volumen	1,0	70	0,31	$0,130 \pm 0,008$	$0,32 \pm 0,01$
	1,8	74	0,47	$0,10 \pm 0,03$	$0,19 \pm 0,03$
	2,8	74	0,63	$0,17 \pm 0,07$	$0,26 \pm 0,11$

Bedingungen: $q_L = 1,3 \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$; $n = 865 \text{ min}^{-1}$; Wasserglas (250 g/t), Na-Oleat (200 g/t), MIBC (500 g/t); $pH = 9,0$, $\mu_{SiO_2, su} = 10 \%$ und Abstand zwischen Trübe-Schaum-Grenze und obere Kante des Auslaufwehres = 1,0 cm

Tabelle 4.2 zeigt das Feststoff- und Wasserausbringen bei Flotation des Quarzes in unterschiedlichen Zellengeometrien und unter gleichen Flotationsbedingungen. Bei diesen Untersuchungen ist nur Quarz als Aufgabegut verwendet worden. Aus den vorliegenden Ergebnissen geht hervor, daß die Quarzprobe nicht flotierbar ist. Außerdem wurde kein stabiler Schaum gebildet. Der ausgebrachte Feststoff im Schaumprodukt (maximales Feststoffausbringen ca. 0,13 %) besteht lediglich aus den Quarzteilchen, die durch das Zerspritzen von Blasen in der Trübe-Schaum-Grenze beim Schaumabstreifen in das Schaumprodukt gelangt sind, sowie aus den feinsten dunkelfarbigem kolloidalen Teilchen, die wahrscheinlich durch den Verschleiß der

Stahlkugeln in der Schwingkugelmühle bei der Probearbeitung entstanden sind. Allerdings wurden wenige große Einzelblasen in der Mitte der Zelle, die teilweise von diesen kolloidalen Teilchen bedeckt sind, beobachtet.

Die Tabelle 4.2 zeigt das Feststoffausbringen und das Wasserausbringen bei der Flotation der synthetischen Mischung von Fluorit und Quarz unter Zusatz eines Schäumers, aber ohne Sammlerzugabe (Natrium-Oleat) unter gleichen Bedingungen wie bei der Standardflotation. Die Ergebnisse zeigen, daß Feststoffausbringen und Wasserausbringen – außer bei Zelle $H/D_1 = 2,0$ mit konstanter Querschnittsfläche ($R_{\text{CaF}_2} = 0,10 \%$ und $R_{\text{H}_2\text{O}} = 0,39 \%$) - praktisch null sind. Somit ist ein Fluoritausbringen im Schaumprodukt durch die Trübeimführung auszuschließen, weil sich nur mit Schäumer als Flotationsreagens kein stabiler Schaum bildet.

Tabelle 4.2: Flotierbarkeit des Quarzes bei verschiedenen Flotationszellengeometrien und der synthetischen Mischung von Fluorit und Quarz als Aufgabegut und ohne Sammlerzugabe

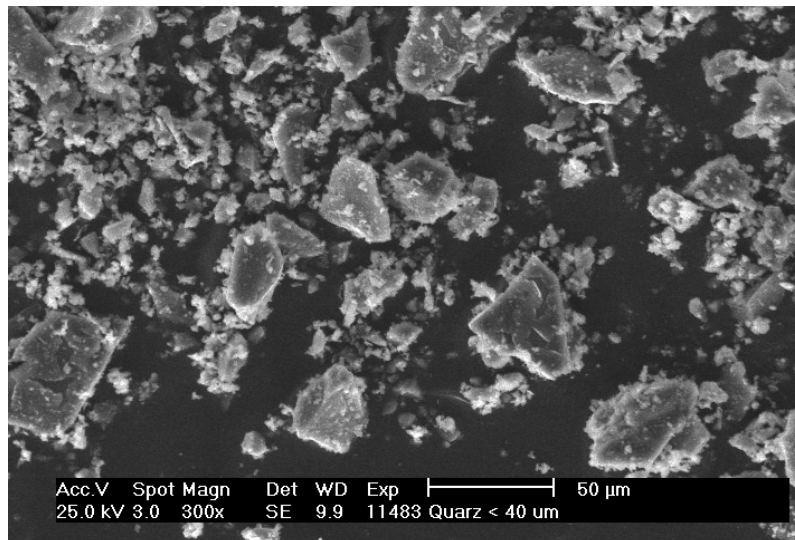
Flotationszelle		Luftvolumenstrom Q_L (cm ³ /s)	Leerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Schaumprodukt	
Bauprinzip	H/D_1			R_m (%)	$R_{\text{H}_2\text{O}}$ (%)
mit konstanter Querschnittsfläche	1,0	70	0,31	0,00	0,00
	1,5	106	0,47	0,00	0,00
	2,0	141	0,63	$0,10 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,09$
mit konstantem Volumen	1,0	70	0,31	0,00	0,00
	1,8	74	0,47	0,00	0,00
	2,8	74	0,63	0,00	0,00

Bedingungen: $q_L = 1,3 \text{ cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{min})$; $n = 865 \text{ min}^{-1}$; Reagenzien: Wasserglas (250 g/t) und MIBC (500 g/t); $\text{pH} = 9,0$; $\mu_{\text{SiO}_2, \text{su}} = 10 \%$ und Abstand zwischen Trübe-Schaum-Grenze und obere Kante des Auslaufwehres = 1,0 cm

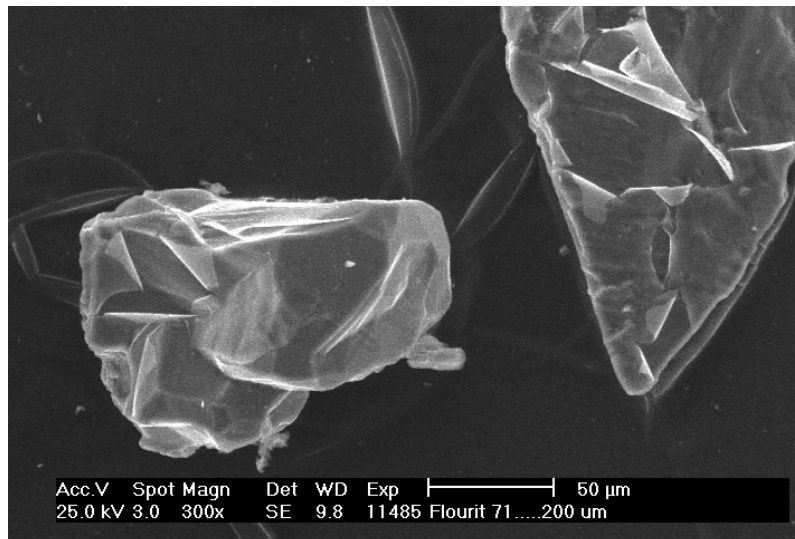
Das Bild 4.1 zeigt die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen (Vergrößerung 300 fach) des Aufgabegutes der Quarzprobe $<40 \mu\text{m}$ und der Fluoritprobe $71 \dots 200 \mu\text{m}$ sowie des gesiebten Schaumproduktes $>50 \mu\text{m}$ (Fluorit), das unter Standard-Versuchsbedingungen erzielt worden ist. Beim Vergleich der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Quarzprobe und der Fluoritprobe des Aufgabegutes mit den Aufnahmen vom gesiebten Schaumprodukt ist zu erkennen, daß eine Bildung von Schlammüberzügen der feinen Quarzteilchen auf den relativ groben Fluoritteilchen unter den genutzten Flotationsbedingungen ausgeschlossen werden kann.

Aus den Ergebnissen kann man schlußfolgern, daß unter den angewandten Versuchsbedingungen die Quarzteilchen nur durch Trübeimführung und nicht durch Heterokoagulation (echte Flotation) oder die Bildung von Schlammüberzügen in das Schaumprodukt gelangen können. Die Fluoritteilchen werden dagegen nur durch Heterokoagulation ins Schaumprodukt ausgebracht.

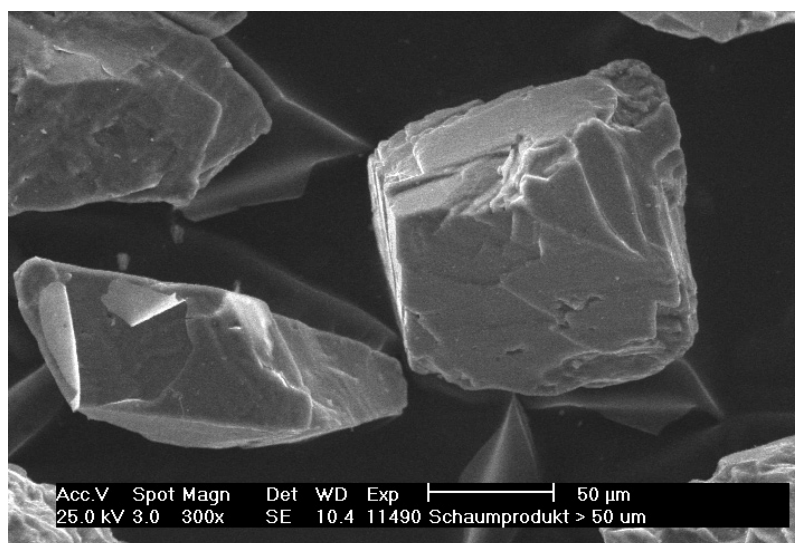
Es ist noch offen, ob die Benutzung eines Mineralgemisches als Versuchsgut, in dem die hydrophoben Teilchen größer als die hydrophilen Teilchen sind, zu gleichen Tendenzen der Flotationsergebnisse wie ein Aufgabegut mit normaler Teilchengrößenverteilung führt. Mit den Untersuchungen zur Wirkung wichtiger Prozeßparameter auf die Trübeimführung sollte das überprüft werden.



Quarzprobe (<40 μm)



Fluoritprobe (71 ... 200 μm)



gesiebtes Schaumprodukt (>50 μm)

Bild 4.1: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen einer Quarzprobe (Q_1 <40 μm), Fluoritprobe (71 ... 200 μm) und eines gesiebten Schaumproduktes >50 μm (Fluorit)

4.2 Wirkung wichtiger Prozeßparameter auf die Trübe mitführung

Wie im Abschnitt 2.1.2 erwähnt, sind die in der Literatur veröffentlichten experimentellen Ergebnisse zur Wirkung verschiedener Prozeßparameter auf das Ausbringen durch Trübe mitführung widersprüchlich. Deshalb waren der Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabetrübe, der Schaumhöhe, der Trübedichte und des spezifischen Luftdurchsatzes auf die Trübe mitführung und deren Reduzierung gezielt zu untersuchen. Ziel ist dabei, die Wirkung dieser Einflußgrößen weiter aufzuklären und insbesondere die neu entwickelte Methode zur getrennten Bestimmung des Ausbringens durch Trübe mitführung und Heterokoagulation zu verifizieren.

4.2.1 Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabetrübe

Die Untersuchung der Zusammensetzung der Aufgabetrübe erfolgte durch Änderung des Quarzgehaltes in der synthetischen Mischung von Fluorit und Quarz. Es sind folgende Quarzgehalte im Aufgabegut a_{SiO_2} untersucht worden: 10 %, 30 %, 50 %, 70 % und 90 % ($100 - a_{\text{SiO}_2} = a_{\text{CaF}_2}$). Die Ergebnisse sind in den Bildern 4.2, 4.3 und 4.4 dargestellt.

Aus Bild 4.2 ist zu erkennen, daß das Wasserausbringen von der Flotationszeit und dem Gehalt an hydrophoben Teilchen in der Aufgabe abhängt. Nimmt der Gehalt an hydrophoben Teilchen in der Aufgabetrübe zu, steigt das Wasserausbringen und somit das Ausbringen durch Trübe mitführung (s. Bild 4.3). Dies ist durch die Einwirkung der hydrophoben Teilchen auf das stabile Schaumvolumen und durch den Wasseranteil, der mit den beladenen Blasen in den Schaum gelangt, zu erklären. Eine Zunahme des Stroms hydrophobierter Teilchen, der durch die Heterokoagulation in die Schaumzone gelangt, behindert weiterhin die Schaumentwässerung sowie das Zurückfließen der Feststoffteilchen im Schaum. Dies vermindert die Schaumverweilzeit [88, 89] und steigert somit die Trübe mitführung. Bei hohem Gehalt der hydrophoben Teilchen ($a_{\text{CaF}_2} = 90\%$) ist auch mit einem Ausbringen durch Einschließung zu rechnen. Nimmt hingegen der Gehalt an hydrophoben Teilchen ab, wird die Bedeckung der Blasenoberfläche mit hydrophoben Teilchen in der Trübezone immer geringer. Dies fördert die Blasenkoaleszenz in der Trübe-Schaum-Grenze und in der Schaumzone. Es bildet sich ein weniger stabiler und nicht voluminöser Schaum. Dadurch wird nicht nur das Ausbringen durch Trübe mitführung vermindert, sondern auch bei einem Quarzgehalt von 90 % das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation beeinträchtigt. Diese Ergebnisse stimmen mit Resultaten von Ross [36], Szatkowski [68] und Gülsoy u.a. [20] überein. Aus diesem Sachverhalt läßt sich allgemein die unterschiedliche Wirkung des Aufgabegehaltes auf die Flotationsergebnisse und Trübe mitführung bei der Vorflotation ($a_{\text{SiO}_2} > 60\%$) und der Reinigungsflotation ($a_{\text{SiO}_2} < 40\%$) ableiten.

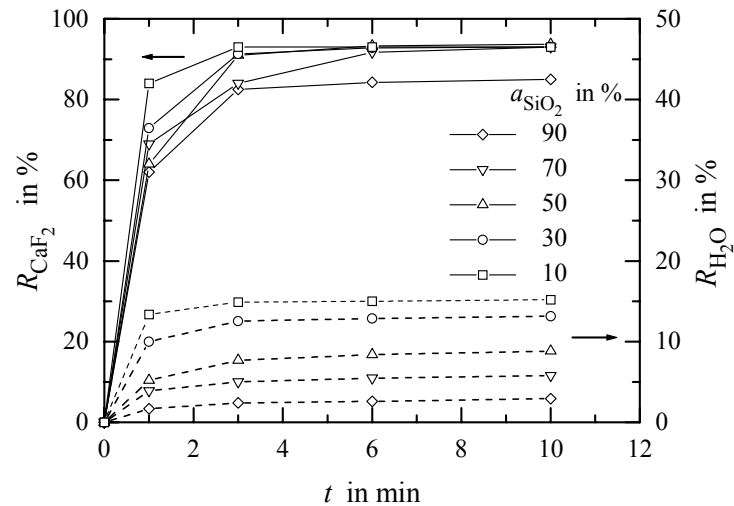


Bild 4.2: Einfluß des Quarzgehaltes im Aufgabegut auf den zeitlichen Verlauf des Fluoritausbringens durch Heterokoagulation und des Wasserausbringens

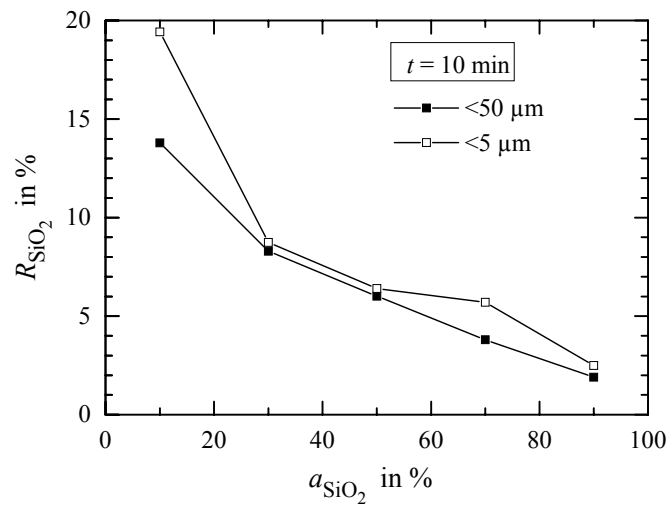


Bild 4.3: Einfluß des Quarzgehaltes im Aufgabegut auf das Ausbringen von Quarz $<50\ \mu\text{m}$ und $<5\ \mu\text{m}$ durch Trübe mitführung

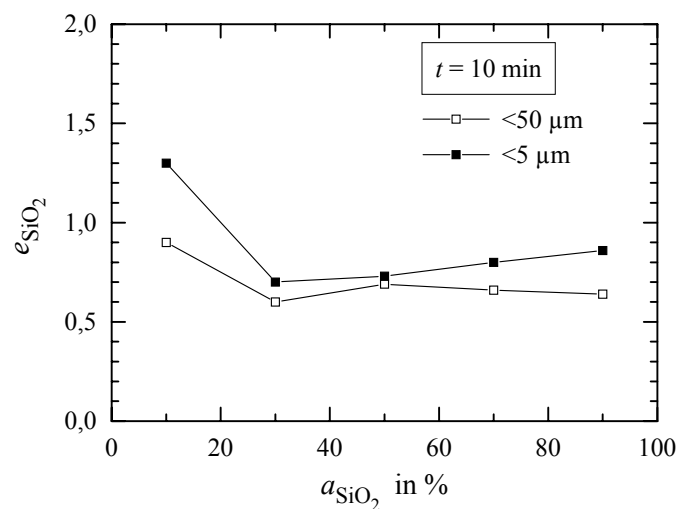


Bild 4.4: Einfluß des Quarzgehaltes im Aufgabegut auf den Trübe mitführungsfaktor des Quarzes $<50\ \mu\text{m}$ und $<5\ \mu\text{m}$

Aus dem Bild 4.2 ist ferner zu erkennen, daß das Fluorit ausbringen ab $t = 6$ min nahezu konstant bleibt. Das heißt, das Fluorit ausbringen hat unter den gewählten Versuchsbedingungen seinen maximalen Wert erreicht. Deshalb ist für die nachfolgenden Untersuchungen die Gesamtflotationszeit der Versuche mit 8 min festgesetzt worden.

Bild 4.4 zeigt die Abhängigkeit des Trübe mitführungsfaktors vom Quarzgehalt im Aufgabegut für die Fraktionen $<50 \mu\text{m}$ bzw. $<5 \mu\text{m}$. Die erhöhten Werte des Trübe mitführungsfaktors e_{SiO_2} für $a_{\text{SiO}_2} < 30 \%$ lassen sich vor allem durch die oben genannten Vorgänge im Schaum erklären. Der Trübe mitführungsfaktor $>1,0$ zeigt an, daß ein Teil des Ausbringens durch Einschließung der hydrophilen Feinstteilchen in der Schaumzone begründet ist. Bei einem hohen Gehalt an hydrophoben Teilchen (Fluorit) in der synthetischen Mischung ($a_{\text{CaF}_2} = 90 \%$) und bei relativ groben Fluoritteilchen führt dieser Mechanismus zur signifikanten Erhöhung des Quarzausbringens im Vergleich zum Wasserausbringen. Unter diesen Bedingungen können die Feststoffteilchen in den Schaumlamellen eine Verengung des Raums zwischen den Blasenwänden, der Schaumlamellen und der *Gibbs*-Kanälen bilden. Dadurch wird das Zurückfließen des Wassers und der feinsten hydrophilen Teilchen in die Trübezone behindert. Somit nimmt das Quarzausbringen durch die Überlagerung der Ausbringensmechanismen Trübe mitführung und Einschließung zu. Dieser Sachverhalt wird in der Literatur bestätigt [34, 65, 73, 79, 124]. Bei $a_{\text{SiO}_2} > 30 \%$ ist demgegenüber der Suspendierungszustand der Trübe in der Zelle entscheidend [1, 14]. Es werden die Feststoffkonzentrationsprofile der unterschiedlichen Teilchengrößen in Abhängigkeit von der Zellenhöhe (vgl. Bild 2.2 im Abschnitt 2.1) und die Erhöhung der Blasenkoaleszenz wegen der immer weniger bedeckten Blasenoberfläche hauptsächlich bestimmend. Diese Ergebnisse stimmen nicht ganz mit denen von *Trahar* [10] überein, wonach der Trübe mitführungsfaktor völlig unabhängig vom Gehalt hydrophober Teilchen in der Aufgabetrübe sein soll. Das wird darauf zurückgeführt, daß *Trahar* seine Untersuchungen nur bei einem konstanten Gehalt von hydrophoben Teilchen im Aufgabegut durchgeführt hat. Dieser Gehalt lag vermutlich in einem Bereich, in welchem der Trübe mitführungsfaktor konstant ist (vgl. Bild 4.4).

Aus den Bildern 4.3 und 4.4 geht zudem hervor, daß das Ausbringen durch Trübe mitführung und der Trübe mitführungsfaktor für Teilchen $<5 \mu\text{m}$ größer als für Teilchen $<50 \mu\text{m}$ sind. Dies befindet sich in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren [4, 10, 19, 21, 22, 33, 35, 42, 46, 50, 68, 71]. Dies kann unmittelbar aus dem Suspendierungszustand, wie anhand der gemessenen Feststoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Zellenhöhe im Abschnitt 4.3.1 gezeigt und wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt wurde, erklärt werden. Feinste Teilchen sind in der Trübe mehr oder weniger homogen suspendiert, während sich für

größere Teilchen entsprechend ihrer Größe und Dichte vertikale Konzentrationsprofile mit nach unten zunehmender Konzentration einstellen (s. hierzu Bild 2.2 im Abschnitt 2.1) [1, 14]. Diese Tendenz wurde auch bei allen anderen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit festgestellt.

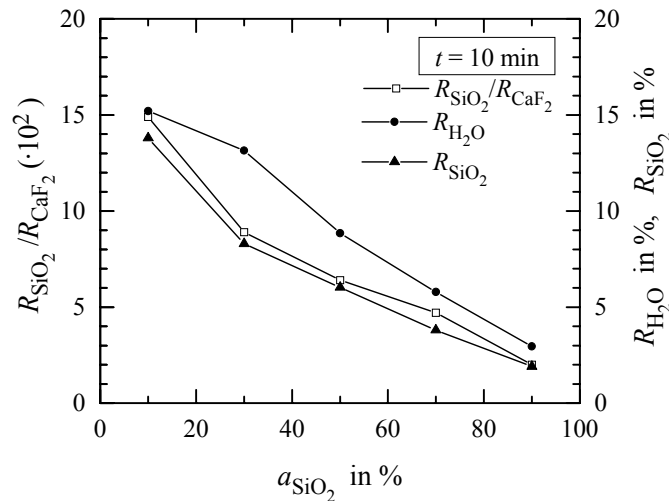


Bild 4.5: Einfluß des Quarzgehaltes in der synthetischen Mischung auf das Verhältnis zwischen dem Ausbringen von Quarz $<50 \mu\text{m}$ durch Trübe mitführung und dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation, auf das Wasserausbringen sowie das Ausbringen von Quarz $<50 \mu\text{m}$

Bild 4.5 zeigt, daß das Verhältnis zwischen dem Quarzausbringen durch Trübe mitführung (R_{SiO_2}) und dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation (R_{CaF_2}) gut mit dem Wasser- und Quarzausbringen korreliert. Deshalb kann dieses Verhältnis genutzt werden, um die Trübe mitführung zu beschreiben und zu bewerten. Eine Erhöhung des Verhältnisses $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ bedeutet, daß die Trübe mitführung relativ zum Wertstoffausbringen zunimmt. Vorteile der Nutzung dieses Verhältnisses sind die geringere Empfindlichkeit gegenüber der Variation des Wasserausbringens bei Durchführung der Laborflotationsversuche und die Berücksichtigung der Wirkung der hydrophoben Teilchen auf die Schaumeigenschaften sowie auf die Erhöhung des Trübevolumenstromes und somit auf die Trübe mitführung.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch der zeitliche Verlauf des Trübe mitführungsfaktors. Das Bild 4.6 stellt den Einfluß der Flotationszeit auf den Trübe mitführungsfaktor und das Verhältnis zwischen dem Quarzausbringen ($<50 \mu\text{m}$) und dem Fluoritausbringen dar. Wie zu erkennen ist, bleiben der Trübe mitführungsfaktor und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ im betrachteten Zeitintervall nahezu konstant. Im Gegensatz dazu hat Ross [35] in Laborflotationsversuchen festgestellt, daß der Trübe mitführungsfaktor mit zunehmender Flotationszeit abnimmt. Ross erklärt dies mit der Verarmung der Trübe an flotierbarem Feststoff in der Trübezone bei zunehmender Flotationszeit, wodurch die Ausbringensrate im Schaumprodukt bei nahezu konstanter Wasserausbringensrate sinkt. Demgegenüber erreichen nach den eigenen

Ergebnissen das Fluoritausbringen, das Wasserausbringen und das Quarzausbringen bei etwa 3 min Flotationszeit ihren maximalen Wert. Bei den zwei letzten Schaumprodukten (3 - 6 min und 6 - 10 min) hat sich nicht nur die Fluoritausbringensrate vermindert, sondern auch die Wasser- und Quarzausbringensrate (vgl. hierzu Bild 4.2 und 4.7). Damit bleiben der Trübe-mitführungsfaktor und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ bei zunehmender Flotationszeit konstant.

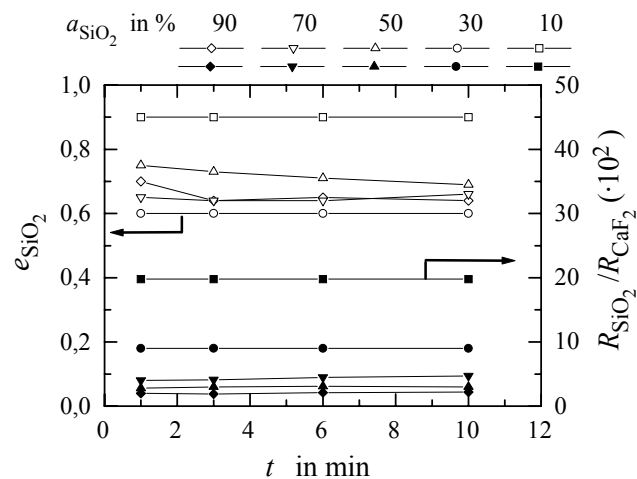


Bild 4.6: Einfluß des Quarzgehaltes in der synthetischen Mischung auf den zeitlichen Verlauf des Trübe-mitführungsfaktors des Quarzes und des Verhältnisses zwischen dem Ausbringen von Quarz $<50 \mu\text{m}$ durch Trübe-mitführung und dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation

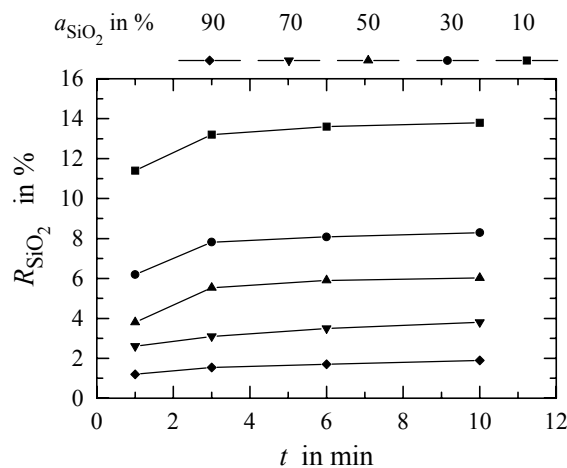


Bild 4.7: Einfluß des Quarzgehaltes in der synthetischen Mischung auf den zeitlichen Verlauf des Ausbringens von Quarz $<50 \mu\text{m}$ durch Trübe-mitführung

4.2.2 Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes

Die Wirkung des Luftvolumenstromes auf die Trübe-mitführung hydrophiler Teilchen ist nicht einfach zu erklären. Bei eigenen Untersuchungen sind die folgenden spezifischen Luftvolumenströme angewendet worden: 0,6; 1,0; 1,3; 2,0 und 2,6 l Luft / (l Trübe · min). Bild 4.8 spiegelt die Ergebnisse dieser Untersuchungen wider. Sie stimmen im Prinzip mit denen anderer Autoren überein [19 bis 21, 51 bis 53, 68, 78], die festgestellt haben, daß sich die Trübe-mitführung hydro-

hydrophiler Teilchen mit sinkendem Luftvolumenstrom verringert. Es ist auch zu erkennen, daß das Wasserausbringen und die Trübe mitführung näherungsweise eine einfachproportionale Abhängigkeit vom spezifischen Luftvolumenstrom aufweisen. Gründe dafür sind die Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit und somit die Verminderung der mittleren Schaumverweilzeit (vgl. Tabelle 4.3), die Bildung größerer Blasen und die Erhöhung des Trübevolumenstromes von der Trübezone in den Schaum bzw. in das Schaumprodukt (s. Bild 4.9).

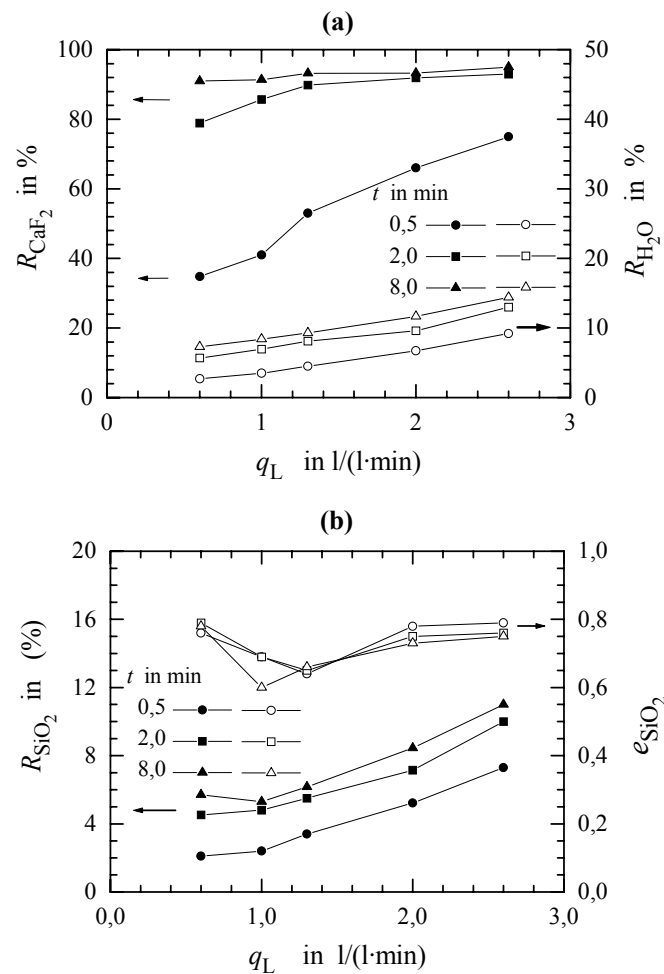


Bild 4.8: Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes auf das Fluoritausbringen und Wasserausbringen **(a)** sowie auf das Ausbringen von Quarz $<50 \mu m$ durch Trübe mitführung und auf den Trübe mitführungsfaktor **(b)**

Tabelle 4.3: Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes auf die Luftleerrohrgeschwindigkeit und die mittlere Schaumverweilzeit

Spezifischer Luftvolumenstrom q_L (l Luft / (l Trübe · min))	Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Mittlere Schaumverweilzeit τ_{sch}^* (s)
0,6	0,15	3,1
1,0	0,22	2,0
1,3	0,33	1,5
2,0	0,50	1,0
2,6	0,66	0,8

* $\tau_{sch} = H_{sch}/u_L$; $H_{sch} = 0,5 \text{ cm}$

Aus dem Bild 4.8a geht ferner hervor, daß das Fluoritausbringen bei einer Flotationszeit von 8 min unabhängig vom spezifischen Luftvolumenstrom ist. Bei geringerer Flotationszeit nimmt das Fluoritausbringen mit zunehmendem spezifischen Luftvolumenstrom zu. Diese Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren [90, 98] überein, wonach die Geschwindigkeitskonstante der Flotation und das Ausbringen der flotierbaren Feststoffteilchen bei konstanter Rotordrehzahl mit steigendem spezifischen Luftvolumenstrom zunächst ansteigt, dann ein Maximum erreicht und danach abfällt. Außerdem haben *Gorain u. a.* [177,178] ein empirisches Modell entwickelt, das auf der bei niedriger Schaumhöhe linearen Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten von dem auf die Querschnittsfläche der Zelle bezogenen Blasenoberflächenstrom ($S_B = 6u_L/d_B$, s. Abschnitt 2.2.5) basiert. Aus der Zunahme des spezifischen Luftvolumenstromes im eingesetzten Bereich und bei konstanter Rotordrehzahl sowie gleichem Reagensregime (nahezu konstante Blasengrößenverteilung, d_B) resultiert dadurch eine Erhöhung des Blasenoberflächenstromes S_B . Folglich werden die Flotationskinetik und das Ausbringen des Fluorits erhöht.

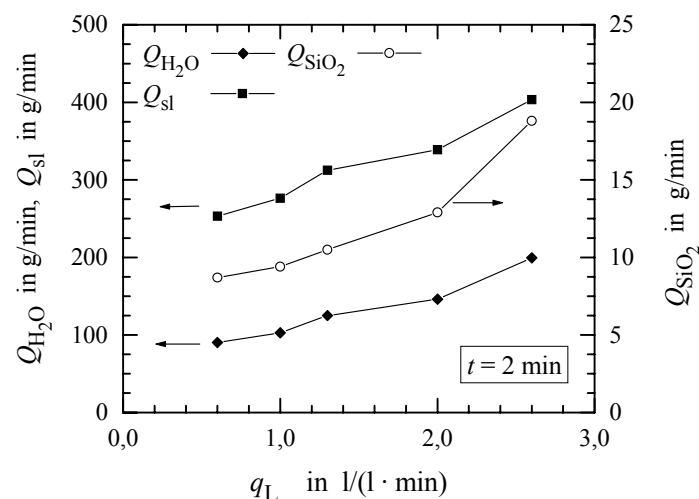


Bild 4.9: Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes auf den mittleren Massestrom von Wasser (Q_{H_2O}), Trübe (Q_{sl}) und Quarz $<50 \mu m$ (Q_{SiO_2})

Der Wert für den Trübe mitführungsfaktor bei einem spezifischen Luftvolumenstrom von $0,6 \text{ l Luft / (l Trübe} \cdot \text{min)}$ läßt sich durch die oben genannte Proportionalität nicht oder nur schwer erklären. *Ross* [65, 71] hat eine Erklärung für diese Erhöhung des Trübe mitführungsfaktors vorgeschlagen. Er hat durch experimentelle kinetische Untersuchungen der Schaumentwässerung und der zurückfließenden Feststoffteilchen festgestellt, daß die Kinetik der Schaumentwässerung mit abnehmendem Luftvolumenstrom schneller wird, während sich die der zurückfließenden Feststoffteilchen verlangsamt (s. hierzu Bilder 2.8 und 2.9). Folglich verringert sich das Verhältnis zwischen Feststoff und Wasser mit zuneh-

mender Schaumhöhe. Außerdem hat Ross festgestellt, daß die Verminderung des Luftvolumenstromes zu einer Verengung der Schaumlamellen bei gleicher Schaumhöhe führt und somit die Einschließung von hydrophilen Teilchen in der Schaumzone fördert. Daraus resultiert in den Schaumlamellen eine Trübe mit höherer scheinbarer Viskosität und verminderter Rückflußgeschwindigkeit der Teilchen. Dadurch ergibt sich ein hoher Trübemitführungsfaktor. Bild 4.8 zeigt eigene Untersuchungsergebnisse, die ein gleiches Verhalten für das Wasserausbringen und das Ausbringen der Feststoffteilchen in den Schaumlamellen bei $q_L < 1,0$ l Luft / (l Trübe·min) aufweisen. Das Zurückfließen der Quarzteilchen ist behindert, wie die Erhöhung des Quarzausbringens mit sinkendem spezifischen Luftvolumenstrom bei $q_L = 0,6$ l Luft / (l Trübe·min) und $t = 8,0$ min im Vergleich zu $q_L = 1,0$ l Luft / (l Trübe·min) zeigt. Dagegen wird das Zurückfließen des Wassers gefördert, wie die sinkende Tendenz des Wasserausbringens verdeutlicht. Folglich nimmt der Trübemitführungsfaktor mit sinkendem Luftvolumenstrom zu. Szatkowski [68] hat diese Behinderung des Rückflusses der Feststoffteilchen bei gleichzeitiger Verminderung des Wassergehaltes schon bei Schaumhöhen von 1 - 3 cm bei einer Steinkohlen-Flotation im Labormaßstab nachgewiesen. Außerdem kann bei einem spezifischen Luftvolumenstrom von $0,6$ l Luft / (l Trübe·min) die Bedeckung der Blasenoberfläche mit hydrophoben Teilchen stärker als bei den anderen Luftvolumenströmen sein. Daraus resultiert ein stabilerer, stärker beladener Schaum, der das Zurückfließen der Feststoffteilchen in der Schaumlamelle und die Blasenkoaleszenz an der Trübe-Schaum-Grenze und in der Schaumzone verhindert. Das Ausbringen der hydrophilen Teilchen durch die Trübemitführung wird vergrößert und das Fluoritausbringen konstant gehalten.

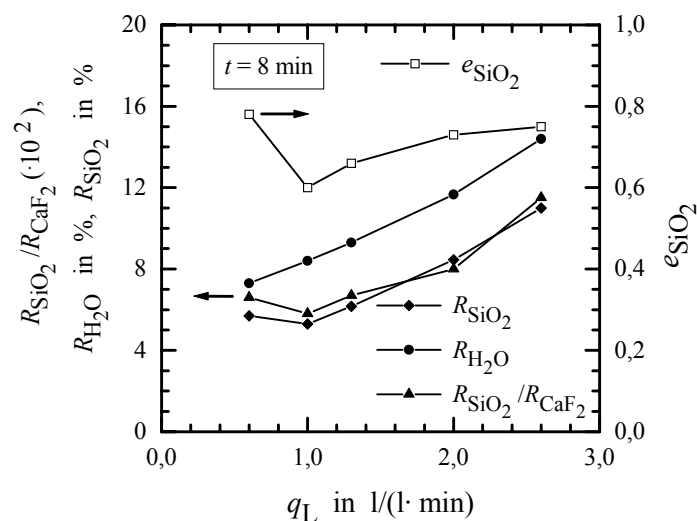


Bild 4.10: Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes auf das Verhältnis zwischen dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation und dem Ausbringen von Quarz $< 50 \mu m$ durch Trübemitführung, auf das Wasserausbringen, auf das Quarzausbringen sowie auf den Trübemitführungsfaktor des Quarzes

Bild 4.10 zeigt, daß das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ und der Trübemithführungsfaktor e_{SiO_2} gut mit dem Quarzausbringen korrelieren und die Trübemithführung des Quarzes somit gut beschrieben werden kann.

Die Anwendung von zu niedrigen Luftvolumenströmen zur Reduzierung der Trübemithführung hydrophiler Teilchen in industriellen Flotationsanlagen ist nicht zu empfehlen, wenn das Wertstoffausbringen mit sinkendem Luftvolumenstrom bei konstanter Flotationszeit abnimmt.

4.2.3 Einfluß der Schaumhöhe

Die Ergebnisse zum Einfluß der Schaumhöhe gibt Bild 4.11 wieder. Daraus ist zu erkennen, daß sich das Fluoritausbringen, das Wasserausbringen und damit auch die Trübemithführung hydrophiler Teilchen mit zunehmender Schaumhöhe bei sonst gleichbleibenden Flotationsbedingungen vermindern. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren [19, 21, 39, 49, 51, 53, 69, 78, 115]. Mit steigender Schaumhöhe vergrößert sich bei gleichem spezifischen Luftvolumenstrom die mittlere Schaumverweilzeit (von 0,6 s bei $H_{\text{sch}} = 2$ mm, über 1,5 s bei $H_{\text{sch}} = 5$ mm auf 7,0 s bei $H_{\text{sch}} = 23$ mm) und somit die Verweilzeit der Feststoffteilchen im Schaum. Die hydrophilen Teilchen können durch die Schaumentwässerung besser in die Trübe zurückgeführt werden. Daraus resultieren ein vermindertes Wasserausbringen und eine geringere Trübemithführung.

Die Verminderung des Fluoritausbringens ist auf die verwendete Schaumabzugstechnik und den hohen, wenig stabilen Schaum zurückzuführen. Das Schaumprodukt wird bei einer konstanten Tiefe (2 mm: bei $2 \leq H_{\text{sch}} < 5$ mm, und 5 mm: bei $H_{\text{sch}} \geq 5$ mm) über die gesamte Schaumfläche abgezogen. Der Schaum, der tiefer liegt, verbleibt in der Flotationszelle. Außerdem wird der gebildete Schaum wegen der Erhöhung der Blasenkoaleszenz mit zunehmender Schaumhöhe immer instabiler und damit der Rückfluß der hydrophoben Teilchen durch Schaumzusammenbruch vergrößert. Nach diesen Ergebnissen ist entschieden worden, bei allen weiteren Versuchen eine Schaumhöhe von 10 mm zu verwenden, um eine Verfälschung des Ausbringens durch Trübemithführung bei der verwendeten Schaumabzugstechnik aufgrund der Schwankungen der Trübe-Schaum-Grenze infolge der turbulenten Bedingungen zu vermeiden. Bei dieser Schaumhöhe werden ein ausreichendes Fluoritausbringen und ein ausreichend stabiler Schaum gewährleistet.

Die Erhöhung des Trübemithführungsfaktors mit zunehmender Schaumhöhe kann durch die Einschließung eines Teils der feinsten hydrophilen Teilchen in den Schaumlamellen infolge der Verengung der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle mittels Schaumentwässerung und in-

folge der durch die Fluoritteilchen verursachten weiteren Verengung der Wasser- und Feststoffteilchenpassage zwischen den Blasenwänden in den Schaumlamellen und den *Gibbs*-Kanälen erklärt werden. Gleichzeitig wird das Zurückfließen des Wassers durch die Schaumentwässerung weniger behindert. Folglich nimmt der Trübe mitführungsfaktor mit zunehmender Schaumhöhe zu. Dies hat *Ross* bei der Interpretation seiner Ergebnisse von Laborflotationssuntersuchungen von Pyrit- und Phosphat-Erz [65, 71], wie schon beim Einfluß des spezifischen Luftvolumenstromes erwähnt, als Erklärung vorgeschlagen. Die Ergebnisse im Bild 4.12 bestätigen ebenfalls diese Aussage. Während der Wassermassestrom ins Schaumprodukt mit zunehmender Schaumhöhe stark vermindert wird, bleibt der Quarzmassestrom nahezu konstant.

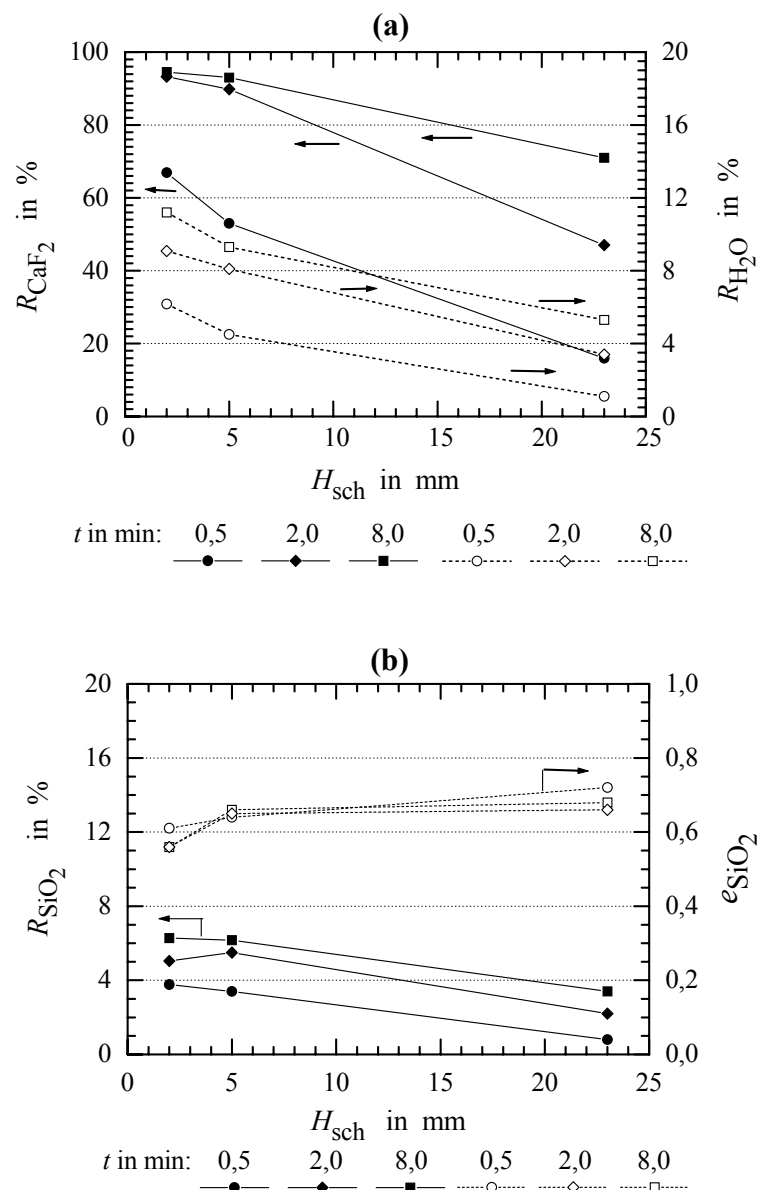


Bild 4.11: Einfluß der Schaumhöhe auf das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation und das Wasserausbringen **(a)** sowie auf das Ausbringen von Quarz $<50 \mu\text{m}$ durch Trübe mitführung und auf den Trübe mitführungsfaktor **(b)**

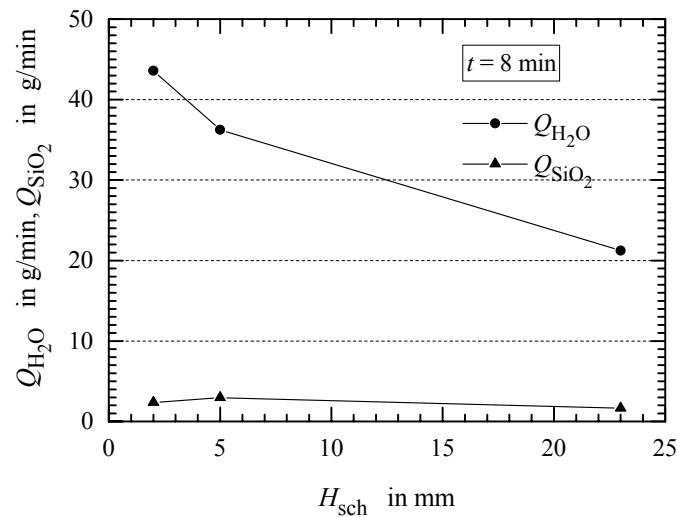


Bild 4.12: Einfluß der Schaumhöhe auf den Wassermassestrom und den Massestrom von Quarz $<50 \mu m$

In Bild 4.13 ist der Einfluß der Schaumhöhe auf das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} und auf den Trübe mitführungsfaktor e_{SiO_2} dargestellt. Mit Zunahme der Schaumhöhe vermindert sich das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} , während sich der Trübe mitführungsfaktor vergrößert. Deshalb kann das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} die Verminderung des Quarzausbringens durch Trübe mitführung bei steigender Schaumhöhe besser beschreiben als der Trübe mitführungsfaktor.

Um die Trübe mitführung hydrophiler Teilchen in industriellen mechanischen Flotationsapparaten zu reduzieren, ist vielfach eine Erhöhung der Schaumschicht vorgenommen worden [46, 50, 152]. Nachteilig an dieser Betriebsweise kann jedoch eine Abnahme des Wertstoffausbringens bei konstanter Flotationszeit sein.

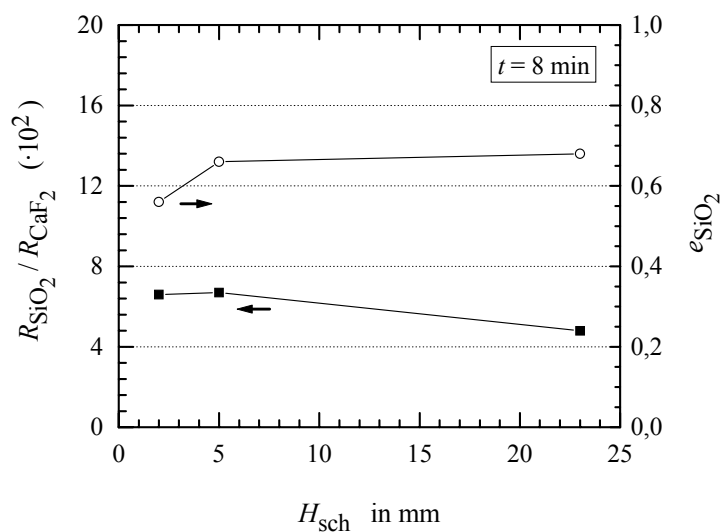


Bild 4.13: Einfluß der Schaumhöhe auf das Verhältnis zwischen dem Ausbringen von Quarz $<50 \mu m$ durch Trübe mitführung und dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation und auf den Trübe mitführungsfaktor von Quarz $<50 \mu m$

4.2.4 Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe

Es sind verschiedene Feststoffmasseanteile, bezogen auf die Gesamtmasse der begasten Trübe μ_{bt} (nämlich: $\mu_{bt} = 5 \%$, 10% , 15% , 20% und 30%), bei einem Masseverhältnis von Fluorit zu Quarz 1:1 und unterschiedlichen Schaumhöhen ($H_{sch} = 5 \text{ mm}$ und 10 mm) untersucht worden. Die Ergebnisse sind in den Bildern 4.14, 4.15 und 4.16 dargestellt.

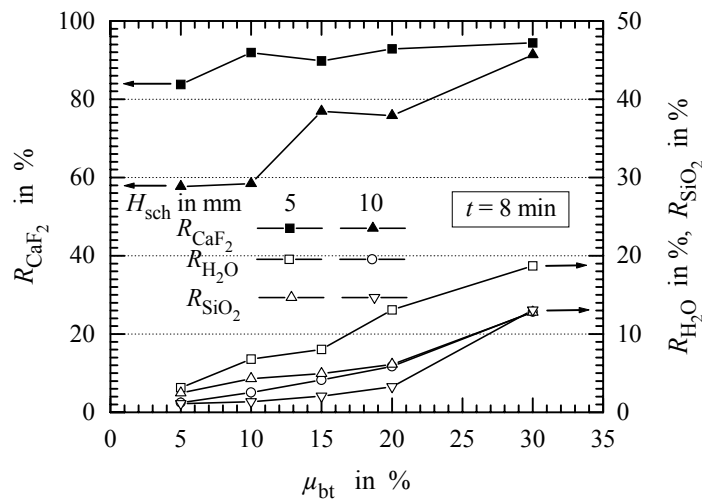


Bild 4.14: Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe (μ_{bt}) auf das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation, das Wasserausbringen und das Ausbringen von Quarz $<50 \mu m$ durch Trübemitführung bei unterschiedlicher Schaumhöhe

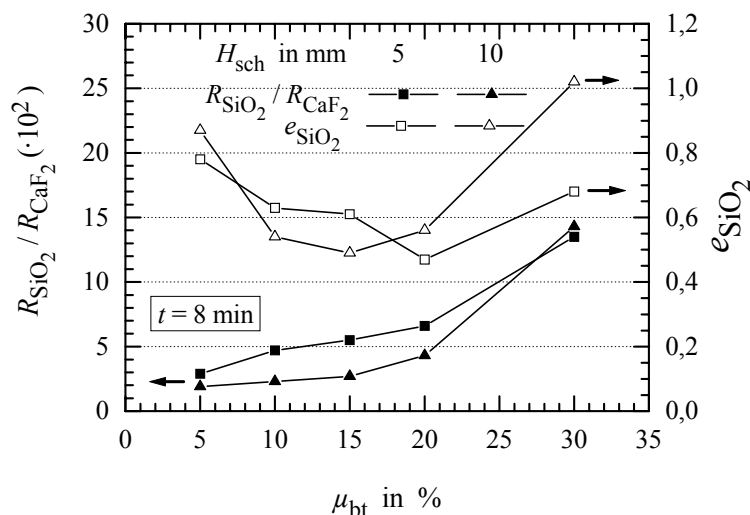


Bild 4.15: Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe (μ_{bt}) auf das Verhältnis zwischen dem Ausbringen von Quarz $<50 \mu m$ durch Trübemitführung und dem Fluoritausbringen durch Heterokoagulation und den Trübemitführungsfaktor von Quarz $<50 \mu m$ bei unterschiedlicher Schaumhöhe

Aus den Bildern 4.14 und 4.15 ist deutlich zu erkennen, daß das Fluoritausbringen, das Wasserausbringen und die Trübemitführung bei beiden Schaumhöhen vom Feststoffmasseanteil in

der begasten Trübe abhängen. Nimmt der Feststoffmasseanteil zu, steigen auch das Fluoritausbringen sowie das Wasserausbringen und somit das Quarzausbringen durch Trübemitführung und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$. Mit der Vergrößerung der Schaumhöhe vermindert sich bis zu einem Feststoffmasseanteil ≤ 20 % allerdings das Fluorit-, das Wasser- und das Quarzausbringen sowie das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ infolge der Zunahme der Schaumstabilität, der mittleren Schaumverweilzeit ($\tau_{\text{sch}} = H_{\text{sch}}/u_L$) von 1,6 s auf 3,6 s und somit der Schaumentwässerung. Dagegen nimmt bei einem Feststoffmasseanteil von 30 % der Einfluß der Erhöhung der Schaumhöhe auf das Quarz- und Fluoritausbringen und somit auf das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ ab. Bild 4.15 zeigt auch, daß sich der Trübemitführungsfaktor e_{SiO_2} anders verhält. Er ist nahezu konstant im Bereich von $10\% \leq \mu_{\text{bt}} \leq 20\%$ und vergrößert sich bei weiterer Variation unter- und oberhalb dieses Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe.

Die Erhöhung des Fluorit-, Wasser- und des Quarzausbringens sowie des Verhältnisses von $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ und der Verlauf des Trübemitführungsfaktors e_{SiO_2} mit zunehmendem Feststoffmasseanteil sind durch die Wirkung der Zunahme der Feststoffkonzentration der hydrophilen und hydrophoben Teilchen im Trübemassestrom, der in den Schaum gelangt, und der Erhöhung der scheinbaren Viskosität auf die Eigenschaften des gebildeten Schaumes erklärbar. Bei niedrigem Feststoffmasseanteil (5 und 10 %) wird ein wäßriger und gering beladener Schaum mit geringerer Stabilität beobachtet. Dadurch sind das Fluorit-, Wasser- und Quarzausbringen vermindert. Insbesondere wird das Fluoritausbringen bei hoher Schaumhöhe ($H_{\text{sch}} = 10$ mm) drastisch reduziert. Gründe dafür können eine hohe Blasenkoaleszenz an der Trübe-Schaum-Grenze und im Schaum infolge der geringen Bedeckung der Blasenoberfläche bzw. die Blasenbeladung mit hydrophoben Teilchen (Fluorit) sein. Mit weiterer Zunahme des Feststoffmasseanteils (15 und 20 %) wird einerseits ein Schaum mit größerer Stabilität gebildet, der das Fluoritausbringen erhöht. Andererseits tritt eine Verschlechterung der Schaumentwässerung und somit eine Verhinderung des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen in die Trübe infolge der Erhöhung der Feststoffkonzentration im Trübemassestrom sowie der scheinbaren Viskosität der Trübe ein. Daraus resultieren eine Erhöhung des Wasserausbringens und des Quarzausbringens durch Trübemitführung. Tabelle 4.4 zeigt, daß die scheinbare Viskosität unter dem eingesetzten Reagensregime bei einer Trübetemperatur von $T = 20$ °C, Schergeschwindigkeit von 1312 s^{-1} und pH 9,0 mit steigendem Feststoffmasseanteil in der Trübe (μ_{su}) zunimmt. Bei weiterer Steigerung des Feststoffmasseanteils ($\mu_{\text{bt}} = 30$ %) wird ein stark beladener Schaum mit noch größerer Stabilität beobachtet. Deshalb nimmt das Fluoritausbringen bei einer Schaumhöhe von 10 mm zusätzlich zu. Unter diesen Bedingungen führt mit hoher Wahrscheinlichkeit die Einschließung der feinen hydrophilen Teilchen in den Schaumlamellen zu einem Trübemitführungsfaktor größer 1,0 (s. Bild 4.15).

Tabelle 4.4: Einfluß des Feststoffmasseanteils in der Trübe der synthetischen Mischung von Quarz und Fluorit (1:1) auf die scheinbare Viskosität der Trübe bei dem verwendeten Reagensregime in den Flotationsversuchen

Feststoffmasseanteil μ_{su} in %	Scheinbare Viskosität η^* in mPa·s
0 (nur Wasser)	1,00
15	1,28
20	1,49
30	2,03

* $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Messungen mit Zylinder-Rotationsviskosimeter Rheotest 2, Schergeschwindigkeit: 1312 s^{-1}

Den Nachweis für diese Interpretation liefert auch Bild 4.16. Aus dieser Darstellung kann man ableiten, daß das Verhältnis zwischen Feststoff und Wasser mit zunehmendem Feststoffmasseanteil zunimmt. Die Erhöhung der Schaumhöhe führt zu einer weiteren Verstärkung dieses Effektes. Damit wird das Zurückfließen der Teilchen durch die Erhöhung ihrer Konzentration und der scheinbaren Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen behindert. Analoge Ergebnisse werden auch von Moudgil [126] bei Laborflotationstests mit Phosphat-Erzen angegeben. Er schlußfolgert, daß die Erhöhung der scheinbaren Viskosität des Schaumes durch die Zunahme der Quarzteilchenkonzentration im Schaum verursacht wird und daß das Phosphatausbringen direkt proportional und der Phosphatgehalt im Schaumprodukt umgekehrt proportional zu dieser Erhöhung infolge der Verlangsamung der Schaumentwässerung und des Rückflusses der Quarzteilchen sind [126].

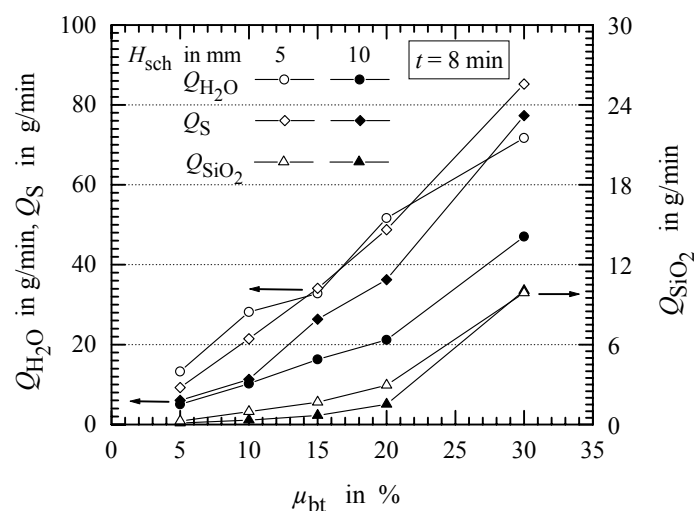


Bild 4.16: Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe (μ_{bt}) auf den Wassermassestrom (Q_{H_2O}), den Feststoffmassestrom (Q_s) und den Massestrom von Quarz $<50\text{ }\mu\text{m}$ durch Trübe mitführung bei unterschiedlicher Schaumhöhe (H_{sch})

Auch andere Autoren haben eine Zunahme der Trübe mitführung mit steigendem Feststoffmasseanteil in der Trübe infolge Erhöhung der scheinbaren Viskosität der Trübe in der Trü-

bezogene und im Schaum festgestellt [22, 50, 54, 65, 71, 86, 116, 128]. Eine mögliche Ursache für die von Trahar [10] festgestellte Unabhängigkeit des Trübe mitführungsfaktors vom Feststoffmasseanteil in der Trübe kann der von ihm untersuchte eng begrenzte Feststoffmasseanteilsbereich (16 bis 27 %) sein. Bild 4.15 zeigt z. B. auch, daß der Trübe mitführungsfaktor bei einem Feststoffmasseanteil zwischen 10 % und 20 % und bei einer Schaumhöhe von 10 mm als nahezu konstant interpretierbar ist.

Aus den gezeigten Ergebnissen kann man zudem die positive Wirkung einer Trübe verdünnung bei der industriellen Reinigungsflotation erklären. Nachteilig an dieser Betriebsweise sind die gleichzeitige Reduzierung des Wertstoffausbringens und die Erhöhung des benötigten Trübe volumens der Flotationsaufgabe bei gleicher Feststoffmenge und konstanter Flotationszeit.

4.3 Schlußfolgerungen zu den bisherigen Ergebnissen

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann geschlußfolgert werden, daß die neu entwickelte Methode zur Bestimmung der Trübe mitführung (s. Abschnitt 3.1.4) die gleiche Tendenz der Ergebnisse wie bei den meisten Autoren liefert. Die Verwendung eines Mineralgemisches, bei dem die hydrophoben Teilchen größer als die hydrophilen sind, erbringt repräsentative Ergebnisse. Trotz der deutlichen Unterschiede zu einem Aufgabegut mit normaler Teilchengrößenzusammensetzung und der daraus resultierenden Veränderung der Flotationsbedingungen können übertragbare Aussagen zur Trübe mitführung hydrophiler Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten getroffen werden. Durch diese Methode wird die getrennte Bestimmung der Beiträge von Trübe mitführung und Heterokoagulation am Gesamtausbringen deutlich vereinfacht, ohne die Aussagefähigkeit der Wirkung der Einflußgrößen auf die Flotationsergebnisse einzuschränken. Die verwendete synthetische Mischung aus Fluorit (hydrophobierter Feststoff) und Quarz (hydrophiler Feststoff) erwies sich als gut geeignet zur getrennten Bestimmung des Ausbringens durch Heterokoagulation und Trübe mitführung, weil Quarz ausschließlich durch Trübe mitführung und Fluorit nur durch Heterokoagulation ins Schaumprodukt gelangen. Dies konnte durch Untersuchungen zur Flotierbarkeit des Quarzes und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (keine Bildung von Schlammüberzügen) nachgewiesen werden. Weiterhin ist festzustellen, daß das Verhältnis zwischen Quarzausbringen durch Trübe mitführung und Fluoritausbringen durch Heterokoagulation die Trübe mitführung besser als die alleinige Betrachtung des Trübe mitführungsfaktors e_{ij} beschreiben kann, weil es vom unvermeidlichen Fehler bei Durchführung der Wasserzugabe und somit von der Abweichung des Wasserausbringens bei den Laborversuchen unabhängig ist. Diese Verhältniszahl liefert auch die bessere Korrelation mit dem Ausbringen durch Trübe mitführung und der Konzentratqualität als der

bisher bevorzugte Trübe mitführungsfaktor e_{ij} . Außerdem ist in dieser Beziehung die Wirkung der hydrophoben Teilchen auf die Schaumeigenschaften, auf die Schaumvorgänge sowie auf den Trübevolumenstrom in die Schaumzone und in das Schaumprodukt eingeschlossen.

Mit Hilfe der neu entwickelten Methode wird ein Beitrag zur Erklärung der in der Literatur teilweise widersprüchlichen Auffassung zur Wirkung der Zusammensetzung der Aufgabetrübe, des Luftvolumenstromes und des Feststoffmasseanteils in der Trübe auf die Trübe mitführung der hydrophilen Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten geleistet. Die widersprüchlichen Aussagen in der Literatur konnten durch die folgenden Begründungen erklärt werden:

- für die Zusammensetzung der Aufgabetrübe: Verwendung enger Bereiche der Zusammensetzung der Aufgabetrübe (Verhältnis der Anteile hydrophober und hydrophiler Teilchen), in denen der Trübe mitführungsfaktor konstant ist;
- für den Luftvolumenstrom: Teilvorgänge im Schaum werden nicht beachtet (Kinetik der Schaumentwässerung und Rückfluß der Feststoffteilchen, Verengung der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle, scheinbare Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanälen, Ausbringen durch Einschließung);
- für den Feststoffmasseanteil in der Trübe: Verwendung eines eng begrenzten Feststoffmasseanteils sowie Abwesenheit von hydrophoben Teilchen im Aufgabegut und fehlende Rückwirkung dieser Teilchen auf die Schaumeigenschaften und -vorgänge.

Aus der Untersuchung zum Einfluß wichtiger Prozeßparameter auf die Trübe mitführung geht hervor, daß die Steuerung dieser Prozeßparameter unter den vorgestellten Randbedingungen (konstante Flotationszeit und wenige oder keine Verminderung des Wertstoffausbringens sowie Erhöhung des Durchsatzes der Flotationsanlage) geeignet ist, die Trübe mitführung zu reduzieren oder zu kontrollieren.

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen kann auch geschlußfolgert werden, daß die Trübe mitführung durch die Vorgänge in der Schaumzone unter folgenden besonderen Bedingungen bestimmt wird:

- a) Bei hohem beladenen und stabilem Schaum infolge des hohen Gehaltes an hydrophoben Teilchen in der Aufgabetrübe können die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen behindert werden. Beispiel dafür sind die Flotation von Steinkohle, von industriellen Mineralien (Phosphat, Fluorit, Kalisalz, Baryt), Reinigungsflotation und einer Aufgabetrübe mit sehr hohem Feststoffmasseanteil.
- b) Bei einer Aufgabetrübe mit sehr niedrigerem Gehalt an hydrophoben oder hydrophobierten Teilchen wird ein instabiler, wäßriger und feststoffarmer Schaum gebildet, der einen Kurzschluß der hydrophilen Teilchen und des Wassers (direkter Übergang der Feststoff-

teilchen und des Wassers von Trübezone in das Schaumprodukt) begünstigt. Das trifft z. B. bei der Vorflotation schwach hydrophobierter Teilchen zu.

- c) Bei niedrigem spezifischen Luftvolumenstrom werden die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen infolge der Verengung der Schaumlamellen und der *Gibbs*-Kanäle behindert.
- d) Bei einer Schaumzone von sehr großer Höhe und stark feststoffbeladenem Schaum wird das Ausbringen durch Einschließung der hydrophilen Teilchen begünstigt und damit das Fließverhalten des Schaumes durch die Erhöhung seiner scheinbaren Viskosität verschlechtert.

Unter anderen Versuchsbedingungen wird die Trübemithführung durch den Suspensionszustand und den Trübemassestrom in die Schaumzone bzw. ins Schaumprodukt bestimmt.

Zur Untersuchung der Modifizierung des Suspensionszustandes und der Flockung der hydrophilen Teilchen entschied man sich für den Einsatz einer Quarzprobe mit noch feinerer Teilchengrößenverteilung Q_2 (s. hierzu Bild 3.3). Diese wurde insbesondere bei den Versuchen zum Einfluß des Feststoffmasseanteils in der begasten Trübe benutzt. Die Trübemithführung der Quarzprobe Q_2 war noch größer als die der Quarzprobe Q_1 . Außerdem konnte sie homogener in der Trübe suspendiert werden.

4.4 Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Suspensionszustandes

Bei diesen Untersuchungen soll die Hypothese geprüft werden, ob die Trübemithführung durch die Modifizierung des Suspensionszustandes in der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone mittels der Reduzierung der Turbulenzintensität und somit der Feststoffkonzentration in diesem Bereich beeinflusst werden kann. In diesem Zusammenhang werden auch die Ergebnisse der Feststoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Zellenhöhe und der Turbulenzmessungen bei unterschiedlichen Bedingungen (s. Tabelle 3.5 und Tabelle 3.9) vorgestellt und bewertet.

4.4.1 Feststoffkonzentrationsprofile in Abhängigkeit von der Zellenhöhe

Die vertikalen Konzentrationsprofile wurden an zwei unterschiedlichen Positionen in der Standardflotationszelle (FA und FB) aufgenommen, um den Suspendierungszustand der feinsten Quarzteilchen und der relativ groben Fluoritteilchen zu beurteilen. Die Meßbedingungen dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 3.5 und den Bildern 3.4 sowie 3.5 dargestellt.

Bild 4.17 zeigt die vertikalen Konzentrationsprofile von Fluorit- und Quarzteilchen an Positionen FA und FB in der Flotationszelle bei der unbegasten Suspension. Dieses Bild verdeutlicht, daß die feinsten Quarzteilchen homogen suspendiert sind. Die Quarzit-Konzentration ist über

der Zellenhöhe nahezu konstant und entspricht der Aufgabetrübe. Die Konzentration des Fluorits schwankt hingegen lokal deutlich und unterscheidet sich von der Aufgabetrübe.

Die lokale Schwankung und der unerwartete Verlauf der Fluoritkonzentration in Abhängigkeit von der Zellenhöhe sind vermutlich die verwendete Methode der Probeentnahme und durch die Eigenschaften der Fluoritprobe erklärbar. Die Ausrichtung der Pipettenöffnung entgegen der Hauptströmungsrichtung war das Hauptproblem der verwendeten Methode. Die Hauptströmungsrichtung ist lediglich in einer Einphasenströmung (Wasser) mittels Laserdoppleranemometrie bestimmt worden (Ergebnisse s. Anlage 3). In Suspensionen kann aber die Hauptströmungsrichtung durch die mittels Feststoffteilchen verursachte Turbulenzdämpfung verändert sein. Andererseits kann man die Pipettenöffnung nur senkrecht oder horizontal anordnen, wodurch die Ausrichtung zur Hauptströmung nicht in allen Fällen gegeben ist. Wegen ihrer großen Masse und hohen Sinkgeschwindigkeit kann ein Teil der groben Teilchen beim Anheben der Pipetten verloren gehen. Außerdem ist der Eintritt der groben Fluoritteilchen in die Pipetten gegenüber den kleinen Quarzteilchen erschwert, so daß Fehler nicht auszuschließen sind. Aus diesen Ergebnissen kann man ableiten, daß die verwendete Meßmethode für die Bestimmung der Fluoritkonzentrationsprofile als nicht geeignet angesehen werden kann. Deswegen sind die weiteren Untersuchungen nur mit der Quarzprobe Q₂ als Feststoff durchgeführt worden.

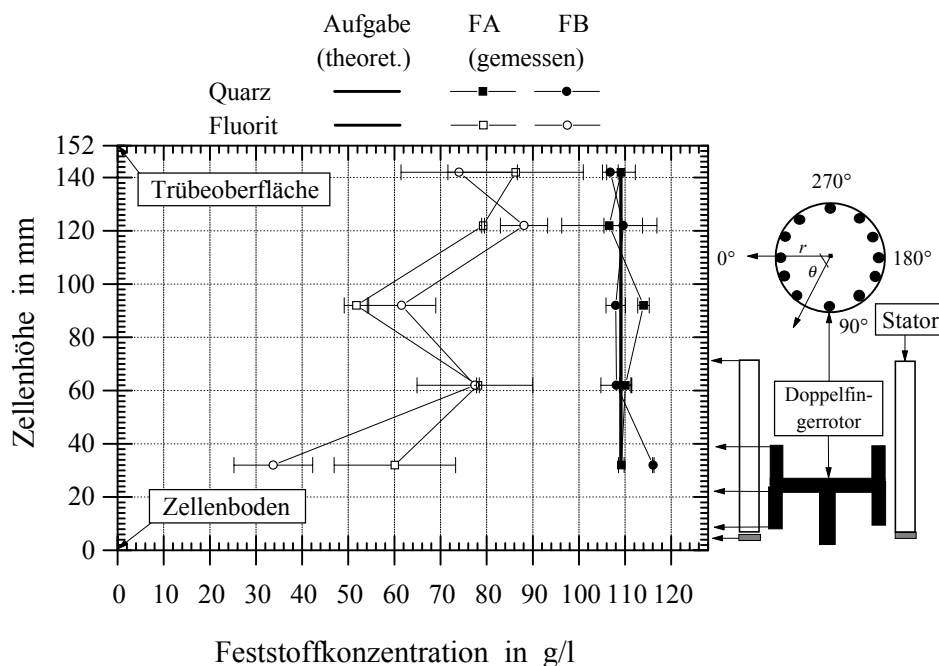


Bild 4.17: Konzentrationsprofile der Fluoritteilchengrößenklasse 71 ... 200 μm und der Quarzteilchengrößenklasse $<50 \mu\text{m}$ in der Aufgabetrübe und in der unbegasten Fluorit/Quarzsuspension in Abhängigkeit von der Höhe in der Standardflotationszelle bei den Meßpositionen FA ($r = 67,3 \text{ mm}$; $\theta = 42^\circ$) und FB ($r = 45,0 \text{ mm}$; $\theta = 90^\circ$)

Die Bilder 4.18 und Bild 4.19 geben die Messungen der vertikalen Quarzkonzentrationsprofile an zwei Meßpositionen für drei Teilchengrößenklassen in der begasten bzw. unbegasten Trübe wieder. Die beiden Bilder gestatten auch einen Vergleich der Quarzkonzentrationen für die einzelnen Teilchengrößenklassen der Aufgabetrübe. Die Ergebnisse bestätigen die nahezu homogene Suspendierung aller drei Teilchengrößenklassen des Quarzes für beide Probeentnahmepositionen und Versuchsbedingungen (mit/ohne Luftzufuhr).

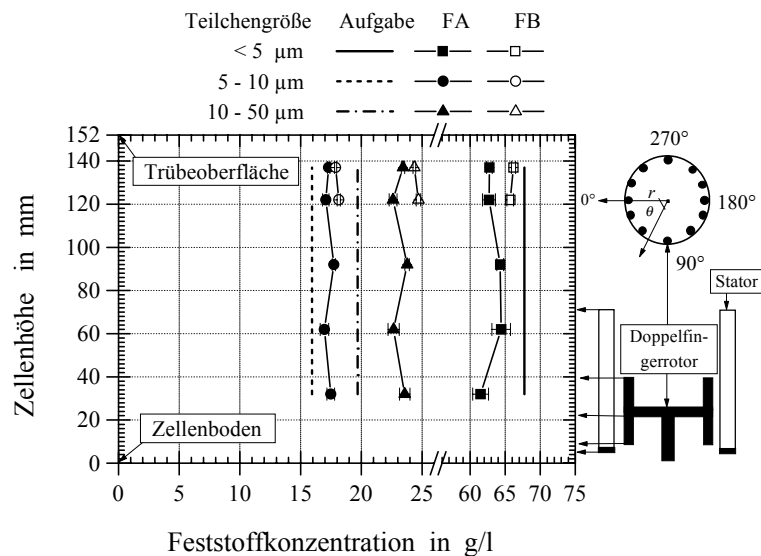


Bild 4.18: Konzentrationsprofile verschiedener Quarzteilchengrößenklassen ($< 5,0 \mu\text{m}$; $5 \dots 10 \mu\text{m}$ und $10 \dots 50 \mu\text{m}$) in der Aufgabetrübe und in der begasten Quarzsuspension in Abhängigkeit von der Höhe in der Flotationszelle bei den Meßpositionen FA und FB

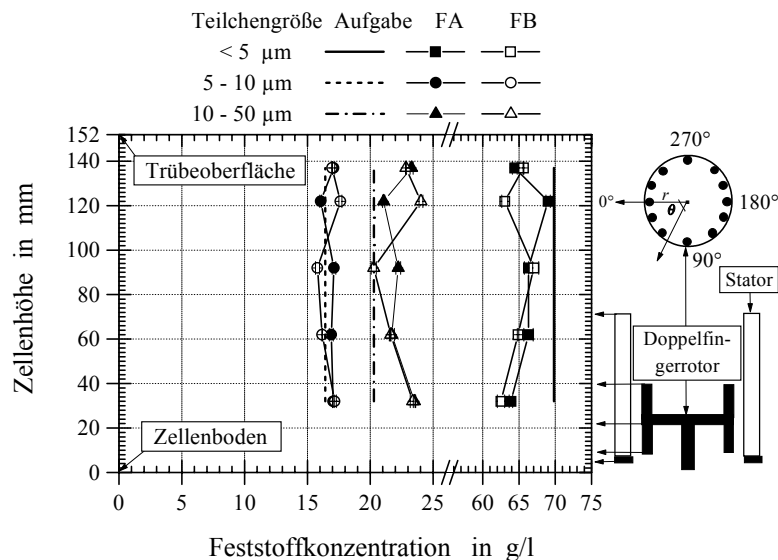


Bild 4.19: Konzentrationsprofile der verschiedenen Quarzteilchengrößenklassen ($< 5,0 \mu\text{m}$; $5 \dots 10 \mu\text{m}$ und $10 \dots 50 \mu\text{m}$) in der Aufgabetrübe und in der unbegasten Quarzsuspension in Abhängigkeit von der Höhe in der Standardflotationszelle bei den Meßpositionen FA und FB

Bei der Teilchengrößenklasse $< 5 \mu\text{m}$ ist die Quarzkonzentration in der Trübe in Abhängigkeit von der Zellenposition stets kleiner als in der Aufgabetrübe. Bei den Teilchengrößenklassen

5 ... 10 μm und 10 ... 50 μm ist dagegen die Konzentration in der begasten Trübe immer größer als in der Aufgabetrübe (Bild 4.18). Bei der unbegasten Trübe entspricht die Quarzkonzentration der Teilchen mit Durchmessern von 5 bis 10 μm der in der Aufgabetrübe. Dagegen ist die Konzentration der größeren Teilchen (10 ... 50 μm) größer als in der Aufgabetrübe (Bild 4.19).

Diese Abweichungen können durch den bevorzugten Verlust der Feinstteilchen bei der Probenbehandlung sowie infolge der Messung der Teilchengrößenverteilung nach einem Trocknungsverfahren erklärt werden. Nach der Probenentnahme werden die Suspensionen bei 110°C getrocknet. Die getrocknete Probe haftet bzw. agglomeriert an den Gefäßwänden. Um die Teilchengröße zu bestimmen, muß die Probe desagglomeriert werden. Bei dieser Verfahrensweise werden einerseits feinste Teilchen (Stäube) gebildet und andererseits nicht alle Agglomerate zerteilt. Dadurch geht ein Teil der feinsten Quarzteilchen verloren oder bleibt in Agglomeraten eingeschlossen. Deshalb werden für die kleinsten Teilchen ($<5 \mu\text{m}$) zu geringe und für die groben Teilchen (5 ... 10 μm und 10 ... 50 μm) vorwiegend größere Konzentrationen als in der Aufgabetrübe gemessen (s. hierzu Bilder 4.18 und 4.19).

4.4.2 Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung der Turbulenz in der Trübezone

Die Beeinflussung des Suspensionszustandes durch die Verminderung der Turbulenzintensität in der Trübe unterhalb der Schaumzone sollte bei gegebenem Leistungseintrag zu einer Reduzierung der Feststoffkonzentration in diesem Bereich der Trübezone führen. Damit sollte die Trübemithführung hydrophiler Teilchen vermindert werden. In diesem Zusammenhang wurden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung der Gestaltung des Prozeßraumes durch die Anwendung unterschiedlicher Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme, die Verwendung von Beruhigungseinbauten (Rost), die Änderung der Zellengeometrie bei Variation des Leistungseintrages und die synergetische Wirkung der Kombination der zwei letzteren Möglichkeiten (Rosteinbau und Zellengeometrie) auf die Trübemithführung und deren Reduzierung präsentiert und erörtert. Weiterhin wird mittels Messungen der Turbulenzparameter in der Standardzelle und Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 2,8 der Einfluß der Modifizierung der Turbulenzintensität durch Änderung der Zellengeometrie interpretiert.

4.4.2.1 Einfluß der Anwendung verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme

Vorangegangene Untersuchungen haben gezeigt, daß Doppelfingerrotoren bereits bei einem relativ geringen Leistungseintrag einen guten Suspenderzustand hervorbringen [92]. *Weiß und Schubert* [16] haben weiterhin herausgefunden, daß dieser Rotortyp, kombiniert mit einem Stator mit radialen, relativ hochgezogenen Blättern (System B), im Vergleich zu den anderen verwendeten Systemen zu einer weitgehenden Beruhigung der Trübeströmung im obo-

ren Trübevolumen und dadurch zu einer stabilen Schaumschicht führt. Folglich war abzuleiten, daß dieses System auch eine günstige Wirkung auf den Suspensionszustand im Trübevolumen unter der Schaumzone hat und damit eine Reduzierung der Trübemithführung bewirken kann. Diese Annahme konnte durch vergleichende Flotationsversuche mit unterschiedlichen Rotor-Stator-Strombrecher-Systemen bestätigt werden (s. Bilder 4.20 und 4.21).

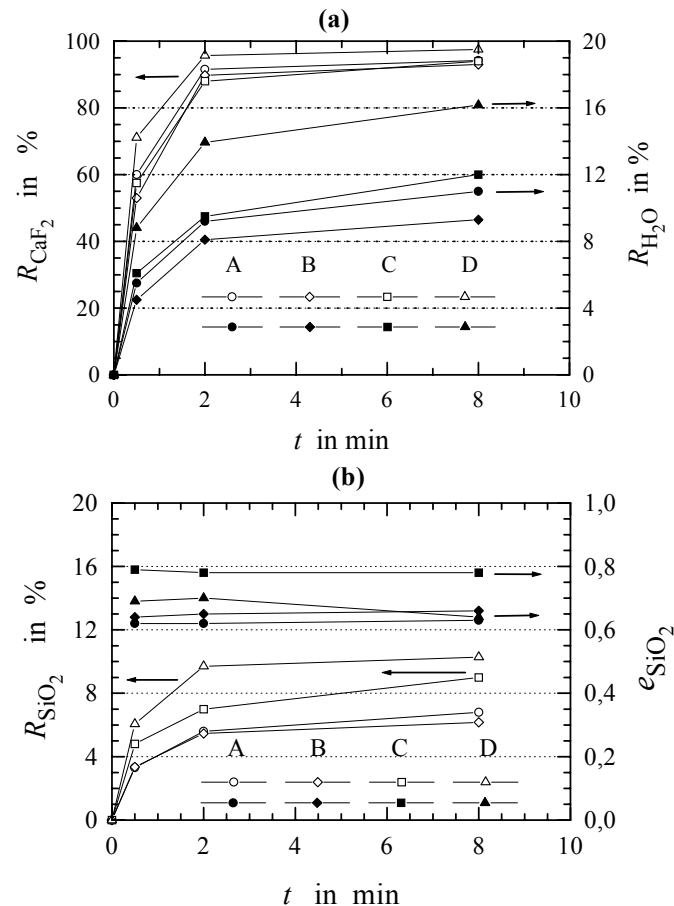


Bild 4.20: Einfluß des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems (Zellenbauart A, B, C und D) auf das Fluorit- ausbringen durch Heterokoagulation und das Wasserausbringen (a) sowie das Ausbringen von Quarz <50 µm durch Trübemithführung und auf den Trübemithführungsfaktor (b)

In Bild 4.20 ist der Einfluß verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme (A, B, C, D) auf die Kinetik des Fluoritausbringens durch Heterokoagulation, des Wasserausbringens und des Quarzausbringens durch Trübemithführung vergleichend dargestellt. Diese Untersuchungen wurden bei einer Schaumhöhe von 5 mm und mit Quarzprobe Q₁ durchgeführt.

Aus dem Bild 4.20 ist zu erkennen, daß das System B die besten Flotationsergebnisse liefert. Bei etwa gleichbleibendem Fluoritausbringen im Konzentrat sind das Wasserausbringen sowie das Ausbringen der hydrophilen Teilchen im Vergleich zu den anderen Systemen (A, C, D) geringer. Das System A bringt etwas schlechtere Ergebnisse als System B hervor. Die Systeme C und D erbringen die ungünstigeren Resultate.

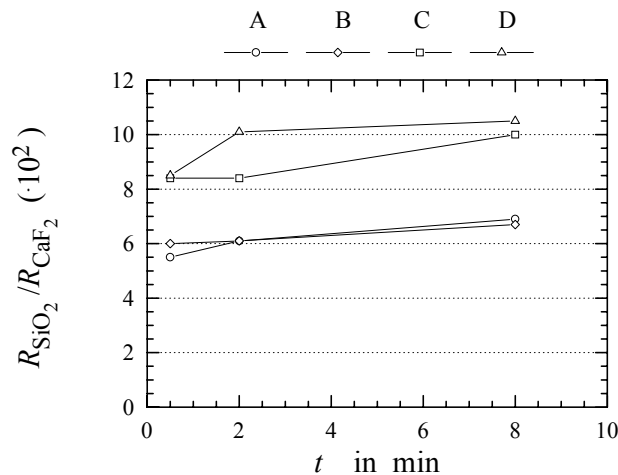


Bild 4.21: Einfluß des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems (Zellenbauart A, B, C und D) auf das Verhältnis von Quarzausbringen durch Trübeimführung zum Fluoritausbringen durch Heterokoagulation und auf den Trübeimführungsfaktor des Quarzes $< 50 \mu\text{m}$

Bild 4.20b veranschaulicht den Einfluß der einzelnen Systeme auf das Quarzausbringen durch Trübeimführung bzw. auf den Trübeimführungsfaktor. Letzterer nimmt bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$ in der Reihenfolge der Systeme $C > B \approx D \approx A$ ab. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Ross [35] bleibt der Trübeimführungsfaktor bei diesen Experimenten über die Flotationszeit nahezu konstant. Aus den Bildern 4.20b und 4.21 kann man erkennen, daß das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ die Flotationsergebnisse und die Trübeimführung des Quarzes besser als der Trübeimführungsfaktor beschreibt, weil dieses Verhältnis bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$ in der Reihenfolge der Systeme $D \approx C > A \approx B$ abnimmt und mit den Flotationsergebnissen somit besser korreliert.

Aus diesen Ergebnissen wird der erhebliche und bestimmende Einfluß der Gestaltung des turbulentenerzeugenden Systems auf den Suspensionszustand und damit auf die Trübeimführung der feinen hydrophilen Teilchen ersichtlich (s. Bild 4.21). Durch die Wahl eines geeigneten Rotor-Stator-Strombrecher-Systems, das eine Beruhigung der Trübeströmung im oberen Zellenraum bewirkt und eine stabile Schaumschicht erzeugt, kann folglich die Trübeimführung - ohne Verringerung des Wertstoffausbringens - reduziert werden.

4.4.2.2 Einfluß der Anwendung von Beruhigungseinbauten (Rost)

Bischofberger [183] hat bei den Untersuchungen zum Einfluß der Anwendung von rostförmigen Einbauten über dem Rotor-Stator-System auf den Flotationserfolg beobachtet, daß durch einen Rost eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse im oberen Bereich der Zelle eintritt und dies somit eine ruhige, stabile Schaumschicht zur Folge hat. Als Konsequenz davon dürften auch Auswirkungen auf den Suspensionszustand im Zellenoberteil zu erwarten sein. Da-

mit können eine Reduzierung der Trübe mitführung und eine Erhöhung der Flotation grober Teilchen erreicht werden. Im folgenden werden die Resultate der Untersuchungen zum Einfluß der Einbauten von verschiedenen Rosttypen in drei unterschiedlichen Rostpositionen (s. hierzu Bild 3.7) in der Standardflotationszelle (System B) bei konstanter Schaumhöhe von 1,0 cm auf die Trübe mitführung und deren Reduzierung aufgezeigt und beurteilt.

Rostposition direkt oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems

In den Bildern 4.22 und 4.23 ist der Einfluß der Rosttypen bei Positionierung direkt oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems auf das Fluoritausbringen, das Wasserausbringen, das Ausbringen sowie den Trübe mitführungsfaktor von Quarz $< 50 \mu\text{m}$, das Verhältnis zwischen Quarz- und Fluoritausbringen und den Quarzgehalt (c_{SiO_2}) bzw. den mittleren Massestrom von Trübe (Q_{sl}), Quarz $< 50 \mu\text{m}$ (Q_{SiO_2}), Feststoffe (Q_{s}) und Wasser ($Q_{\text{H}_2\text{O}}$) in das Schaumprodukt dargestellt.

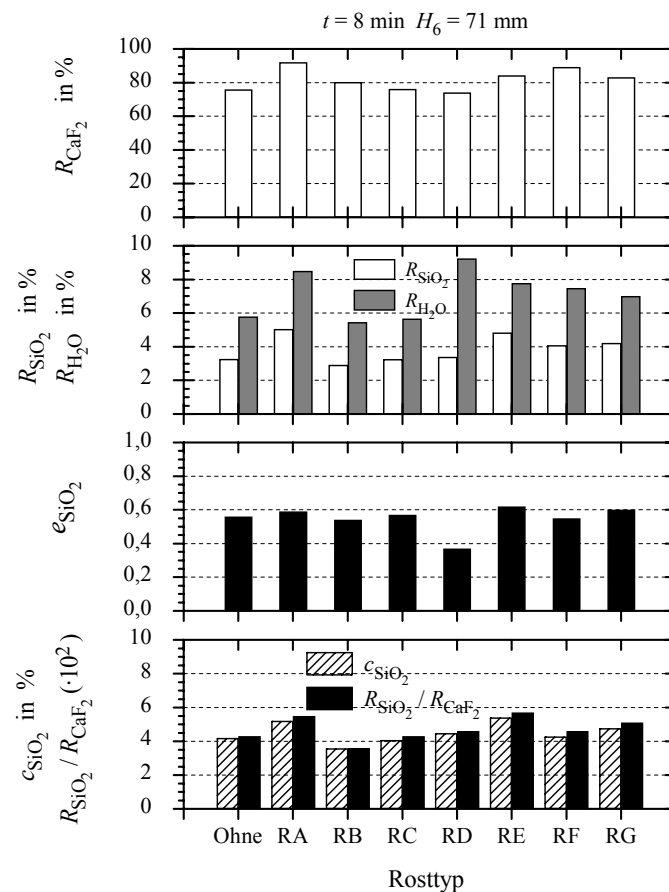


Bild 4.22: Einfluß der Rosttypen bei Position direkt oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems ($H_6 = 71 \text{ mm}$) auf das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation, das Ausbringen durch Trübe mitführung von Quarz $< 50 \mu\text{m}$, das Wasserausbringen, den Trübe mitführungsfaktor, den Quarzgehalt im Schaumprodukt und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$

Aus dem Bild 4.22 ist deutlich zu erkennen, daß sich mit dem Einführen eines Rostes das Fluoritausbringen im allgemeinen vergrößert (nicht bei Rosttyp RD). Der Trübe mitführungs-

faktor, das Verhältnis von $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ sowie das Quarzausbringen durch Trübe mitführung und das Wasserausbringen sind dagegen stark vom Rosttyp abhängig. Die Erhöhung des Fluoritausbringens kann durch die Beruhigung der Strömung im oberen Bereich der Zelle erklärt werden. Unter diesen Bedingungen ist vor allem das Ausbringen der größeren Teilchen begünstigt (verwendetes Fluoritversuchsgut) [1, 92, 97, 130].

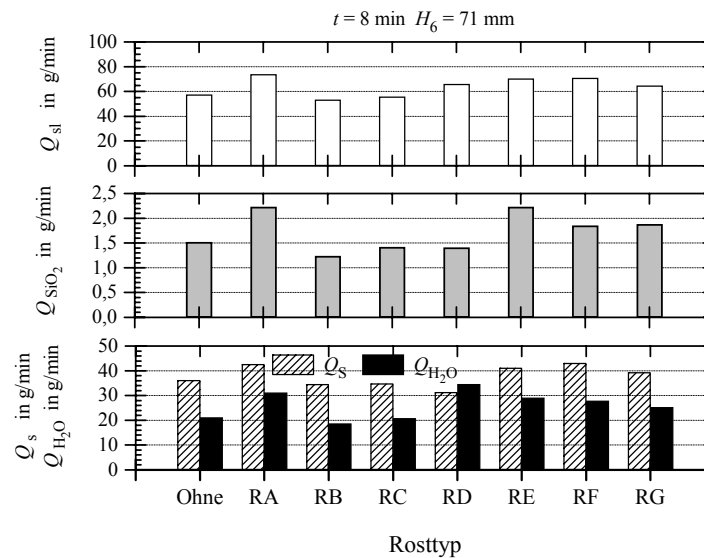


Bild 4.23: Einfluß der Rosttypen bei Position direkt oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems ($H_6 = 71$ mm) auf den mittleren Massestrom von Trübe, Quarz < 50 μm , Feststoffe und Wasser in das Schaumprodukt

Die Rosttypen RB und RC liefern insgesamt die besten Flotationsergebnisse, weil sie ein etwas größeres Fluoritausbringen, ein geringeres Quarzausbringen durch Trübe mitführung und Wasserausbringen sowie einen verminderten Quarzgehalt (s. Bild 4.22) als bei den Versuchen ohne Rost erzeugen. Bei den anderen Rosttypen (RA, RE, RF, RG) hat sich trotz des höheren Fluoritausbringens die Qualität des Schaumprodukts verschlechtert (Bild 4.22). Das Quarzausbringen durch Trübe mitführung und das Wasserausbringen sind erhöht. Folglich sind der Trübe mitführungsfaktor und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ gestiegen. Die Verminderung des Trübe mitführungsfaktors beim Rosttyp RD, ohne daß eine Reduzierung der Trübe mitführung und Verbesserung der Flotationsergebnisse erreicht werden, ist eine Ausnahme. In diesem Fall beschreibt das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ die geringe Erhöhung des Ausbringens durch Trübe mitführung und des Quarzgehaltes im Schaumprodukt (s. Bild 4.22) besser als der Trübe mitführungsfaktor e_{SiO_2} .

Insgesamt kann die Wirkungen der Roste (Bilder 4.22 und 4.23) wie folgt erklärt werden:

- Die besseren Flotationsergebnisse bei den Rosttypen mit geringerer Weite und mittlerer Höhe der Rostöffnungen (RB: $D_R/D_1 = 0,033$ und $H_R/D_1 = 0,20$) und mit mittlerer Weite und klei-

nerer Höhe der Rostöffnung (RC: $D_R/D_1 = 0,083$ und $H_R/D_1 = 0,10$) sind durch eine Beruhigung der Strömung im oberen Bereich der Trübezzone und Erzeugung einer stabilen Schaumschicht, die auch bei anderen Rosttypen außer Rosttyp RD auftritt, zu begründen. Darüber hinaus vermindert sich der mittlere Trübe- sowie Quarzmassestrom und die feststoffbeladenen Blasen in der Trübe-Phase steigen ohne Behinderung auf (Fluoritausbringen größer oder gleich als beim Versuch ohne Rost). Gleichzeitig wurde die Konzentratqualität infolge der günstigeren Bedingungen für die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen und des Wassers in die Trübezzone verbessert. Dies kann durch die Verminderung des mittleren Quarz- und Wassermassestromes bestätigt werden.

- Bei geringerer Weite und kleinerer Höhe der Rostöffnung (RA: $D_R/D_1 = 0,033$ und $H_R/D_1 = 0,10$) können die Flotationsergebnisse im Vergleich zu den anderen Rosttypen und zum Versuch ohne Rost als Folge eines Kurzschlusses des Zusatzwassers während der Durchführung des Flotationsversuches und der Trübe durch den stark geförderten Aufstieg der feststoffbeladenen Blasen und Trübemassestromes in den Schaum erklärt werden. Dies kann durch die überwiegende Erhöhung des Fluorit-, Quarz- und Wasserausbringens und des mittleren Wasser-, Feststoff- und Trübemassestromes bewiesen werden.
- Bei den Rosttypen mit größerer Weite ($D_R/D_1 = 0,187$) und unterschiedlichen Höhen der Rostöffnungen (RD: $H_R/D_1 = 0,07$; RE: $H_R/D_1 = 0,10$; RF: $H_R/D_1 = 0,20$; RG: $H_R/D_1 = 0,33$) ergeben sich mehrere Abhängigkeiten:
 - Bei geringer Höhe des Rostes RD wird eine Verschlechterung der Luftverteilung und damit eine instabile Schaumschicht beobachtet. Gleichzeitig tritt eine außergewöhnliche Erhöhung des Wasserausbringens und des mittleren Wassermassestromes bei konstantem mittleren Quarzmassestrom als Folge eines Kurzschlusses des Zusatzwassers während der Durchführung des Flotationsversuches auf. Damit ist die Verminderung des Fluoritausbringens sowie des Trübemittführungsfaktors und die Verschlechterung der Konzentratqualität bei diesem Rost zu erklären.
 - Bei mittleren Höhen der Roste (RE und RF) verstärkt sich die Beruhigung der Strömung im oberen Bereich der Trübezzone mit zunehmender Höhe des Rostes ($H_R/D_1 = 0,10$ bis $0,20$). Gleichzeitig steigen die feststoffbeladenen Blasen ohne Behinderung auf. Deshalb erhöhen sich das Fluoritausbringen sowie der mittlere Trübe- und Feststoffmassestrom. Bei zunehmender Rosthöhe tritt zudem eine Verringerung des Wasser- und Teilchenkurzschlusses von der Trübe-Phase in das Schaumprodukt auf, die durch die Verminderung des mittleren Quarz- und Wasserstroms und die Verbesserung der Konzentratqualität nachgewiesen wird. Mit noch höheren Rosten (RG: $H_R/D_1 = 0,33$) wird der Aufstieg der feststoffbelade-

nen Blasen zunehmend behindert. Das könnte durch die geringe Verminderung des Fluoritausbringens und des mittleren Feststoff-, Wasser- und Trübemassestromes bei etwa konstantem mittleren Quarzmassenstrom im Vergleich zu den Rosttypen RE und RF bestätigt sein. Folglich verschlechtert sich die Konzentratqualität.

Rostposition in der Trübe-Schaum-Grenze

In den Bildern 4.24 und 4.25 sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der Rosttypen bei Positionierung in der Trübe-Schaum-Grenze dargestellt (Symbole s. Text zu den Bildern 4.22 und 4.23).

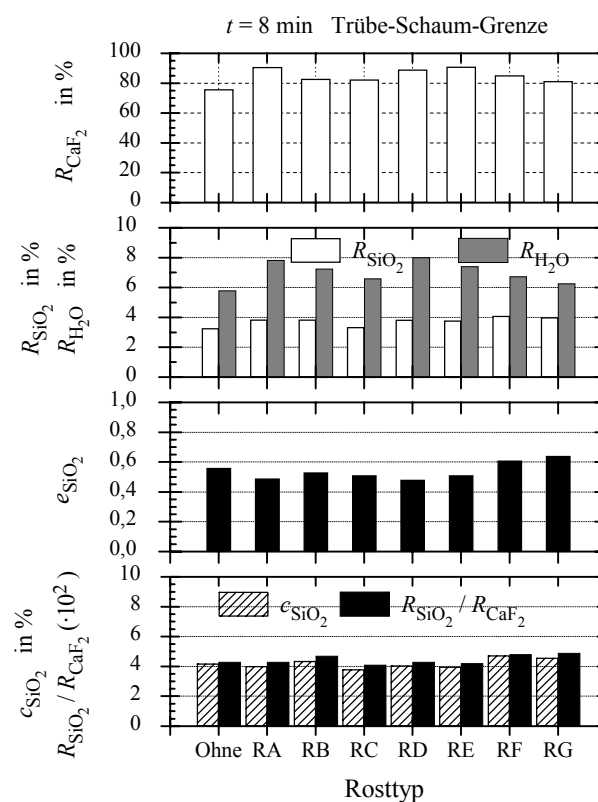


Bild 4.24: Einfluß der Rosttypen bei Position in der Trübe-Schaum-Grenze auf das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation, das Ausbringen durch Trübemitführung von Quarz $< 50 \mu\text{m}$, das Wasserausbringen, den Trübemitführungsfaktor, den Quarzgehalt im Schaumprodukt und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$

Diese Positionierung des Rostes führt bei allen Rosttypen zu einer Erhöhung des Fluoritausbringens sowie des Wasserausbringens bei einem etwa konstanten Quarzausbringen und in den meisten Fällen (Rosttypen RA, RC, RD, RE) zu einer geringen Verminderung des Trübemitführungsfaktors und des Verhältnisses $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ sowie zur Verbesserung der Konzentratqualität (s. Bild 4.24). Diese Ergebnisse sind auf die Verminderung der durch das turbulente Strömungsverhältnis verursachten Schwankungsbewegungen der Trübe-Schaum-Grenze bei allen Rosttypen

und auf die Verzögerung des Zurückfließens hydrophiler Teilchen sowie auf die Begünstigung des bevorzugten Senkrechtaufstiegs der feststoffbeladenen Blasen in diesem Bereich durch die Anwendung von Rosttypen (Bild 4.25) zurückzuführen. Letzteres wird von anderen Autoren als sehr wichtiger Mechanismus zur Entfernung der hydrophilen Teilchen aus der Schaumzone und zur Schaumentwässerung eingeschätzt [42, 68, 71, 78, 89].

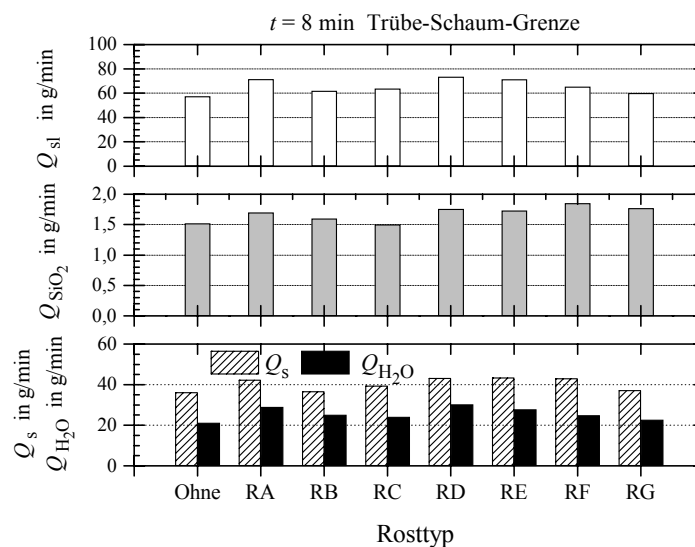


Bild 4.25: Einfluß der Rosttypen bei Position in der Trübe-Schaum-Grenze auf den mittleren Massestrom von Trübe, Quarz <50 µm, Feststoffe und Wasser in das Schaumprodukt.

Außerdem geht aus diesen Ergebnissen (s. Bilder 4.24 und 4.25) hervor, daß die Verminderung des Quarzgehalts im Schaumprodukt bei Anwendung der Rosttypen RA, RC, RD und RE (mit kleineren Höhen der Rostöffnungen: $H_R/D_1 = 0,07$ und $H_R/D_1 = 0,10$) nicht durch die Verminderung des Quarzausbringens, sondern durch die Erhöhung des Fluoritausbringens entstanden ist, weil das Quarzausbringen und der mittlere Quarzmassestrom bei Anwendung dieser Roste gleich oder größer als bei der Flotation ohne Rost sind. Das könnte auch eine gute Erklärung für die Erhöhung des Wertstoffausbringens und –gehaltes bei Anwendung von Rosten bei der Kalisalz-Flotation sein, wie sie von *Bischofberger und Schubert* [92, 96] diskutiert werden.

Der Rosttyp RC mit mittlerer Weite und kleiner Höhe der Rostöffnungen liefert die beste Konzentratqualität, weil er den geringsten Quarzgehalt und das niedrigste Quarzausbringen im Vergleich zu anderen Rosttypen und zum Versuch ohne Rost ergibt. Diese Ergebnisse lassen sich durch Begünstigung des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen bei diesen Rosten im Vergleich zur Flotation ohne Anwendung eines Rostes erklären, wie die geringsten mittleren Quarzmasseströme in dem Bild 4.25 beweisen.

Die Rosttypen RA, RD und RE mit geringeren und größeren Weiten bei kleineren Höhen der Rostöffnungen erbringen schlechtere Resultate. Der geringe Quarzgehalt im Konzentrat im Vergleich zu den Ergebnissen der Flotation ohne Anwendung eines Rostes ist durch das außergewöhnliche hohe Fluoritausbringen bei nahezu konstantem Quarzausbringen entstanden.

Alle Rosttypen mit mittleren und großen Höhen der Rostöffnungen (RB, RF, RG) verschlechtern die Konzentratqualität (Zunahme des Quarzgehalts und -ausbringens im Schaumprodukt) und erhöhen die Trübeimführungsfaktoren (e_{SiO_2} und Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$). Diese Ergebnisse können durch die Behinderung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen und bei den Rosttypen RF und RG durch eine etwaige Verzögerung des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen im Vergleich zu den anderen Rosttypen (außer Rosttyp RC) begründet werden. Dafür sprechen auch die Verminderung des Fluoritausbringens (s. Bild 4.24) und des mittleren Trübemassestromes bei den Rosttypen RB, RF, RG und die Erhöhung des mittleren Quarzmassestromes nur bei den Rosttypen RF und RG (s. Bild 4.25).

Das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ korreliert gut mit dem Quarzgehalt des Schaumprodukts und beschreibt die Abhängigkeit des Quarzgehaltes im Schaumprodukt von den Rosttypen besser als der Trübeimführungsfaktor e_{SiO_2} (s. Bild 4.24).

Rostposition mit gleichem Abstand zwischen Rost/Rotor (H_3) und Rotor/Zellenboden (H_2)

Nach *Bischofberger und Schubert* [92, 96] hat sich bei der Kalisalz-Flotation in einer Flotationszelle mit einem Rotor-Stator-Strombrecher-System Bauart C (s. hierzu Bild 3.6) eine Rostposition als günstig erwiesen, bei der der Abstand von der Rotoroberkante zur Rostunterkante (H_3) etwa dem Bodenabstand der Rotorunterkante (H_2) entspricht. Die Resultate der Untersuchungen zum Einfluß der Rosttypen bei dieser Positionierung sind in den Bildern 4.26 und 4.27 wiedergegeben. Aus den Bildern ist deutlich zu erkennen, daß die Anwendung der Rosteinbauten die Flotationsergebnisse ungünstig beeinflusst. Obwohl bei den Rosttypen RA, RB und RK eine Verbesserung des Fluoritausbringens nachzuweisen ist, sind bei allen Rosttypen dieser Anordnung der Quarzgehalt im Schaumprodukt, der Trübeimführungsfaktor, das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ und das Quarzausbringen durch Trübeimführung (s. Bild 4.26) im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Anwendung des Rostes deutlich vergrößert. Das kann durch die gleichzeitige Begünstigung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen und Verzögerung der Zurückfließens der hydrophilen Teilchen und des Wassers bei Vorhandensein dieser Roste erklärt werden. Dies bestätigen die Erhöhung des Fluoritausbringens (s. Bild 4.26) bzw. des mittleren Trübe-, Quarz-, Wasser- und Feststoffmassestromes in das Schaumprodukt bei allen Rosttypen (s. Bild 4.27) im Vergleich zu den mittleren Masseströmen bei der Flotation ohne Anwendung des Rostes.

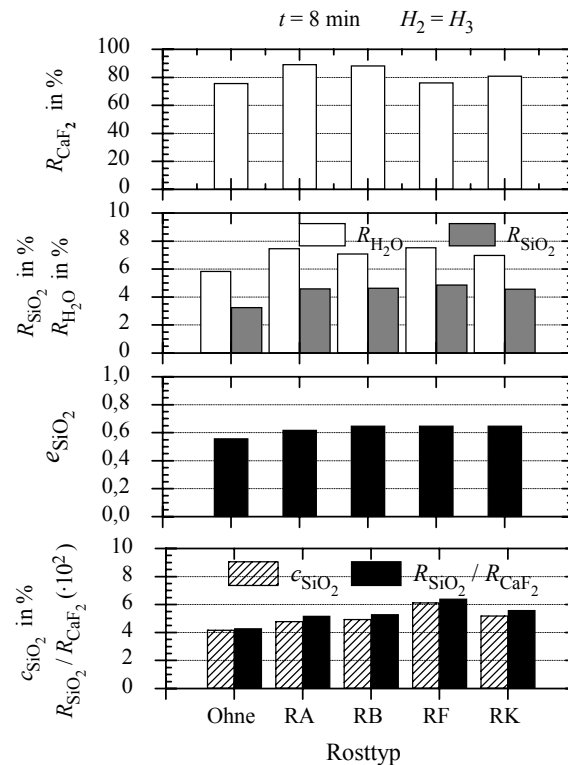


Bild 4.26: Einfluß der Rosttypen bei Position mit gleichem Abstand Rost/Rotor (H_6) und Rotor/Zellenboden (H_2) auf das Fluoritausbringen durch Heterokoagulation, das Ausbringen durch Trübe mitführung von Quarz $< 50 \mu\text{m}$, das Wasserausbringen, den Trübe mitführungsfaktor, den Quarzgehalt im Schaumprodukt und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$

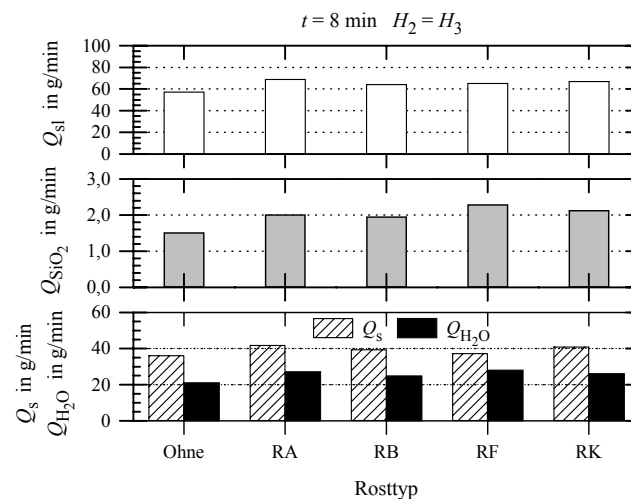


Bild 4.27: Einfluß der Rosttypen bei Position mit gleichem Abstand Rost/Rotor und Rotor/Zellenboden auf den mittleren Massestrom von Trübe, Quarz $< 50 \mu\text{m}$, Feststoffe und Wasser in das Schaumprodukt

Die Unterschiede in den verwendeten Rotor-Stator-Strombrecher-Systemen bedingen mit hoher Wahrscheinlichkeit die konträren Ergebnisse zu den Resultaten von *Bischofberger und Schubert* [92, 96]. Die genannten Autoren verwendeten System C, während in der vorliegenden Arbeit System B genutzt wurde (s. Bild 3.6). Bei System C ohne Rosteinbauten treten starke Schwankungen der Trübe-Schaum-Grenze und zudem noch Trombenbildung auf. Des-

halb wirkt sich bei diesem System die Anwendung der Rosteinbauten zur Bewegungsberuhigung des Trübevolumenes im oberen Bereich der Trübezone, d. h. direkt unterhalb der Schaumzone, positiv auf den Flotationserfolg aus. Im Fall des Systems B ergibt sich ein Beruhigungseffekt teilweise schon durch die Auslegung und Gestaltung der Zelle. Eine zusätzliche positive Wirkung auf die Flotationsergebnisse ist dann weniger zu erwarten.

Konsequenzen aus den Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Rosteinbauten

Aus dem Vergleich der Flotationsergebnisse der unterschiedlichen Rosteinbauten in verschiedenen Positionen geht hervor, daß die Anwendung der Roste eine Verbesserung der Konzentratqualität, eine Verminderung des Trübemitföhrungsfaktors und des Verhältnisses $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ sowie eine Erhöhung des Fluoritausbringens bei Positionierung der Roste mit optimaler Geometrie oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems oder in der Trübe-Schaum-Grenze erzeugen kann. Die Positionierung der Rosteinbauten mit gleichem Abstand zwischen Rost/Rotor und Rotor/Zellenboden ist dagegen ungünstig, weil sich die Flotationsergebnisse verschlechtern. Roste mit optimaler Geometrie oberhalb des Rotor-Stator-Systems können zusätzlich zu einer Reduzierung des Quarzausbringens durch Trübemitföhrung föhren. Bei Positionierung eines Rostes mit geeigneter Geometrie in der Trübe-Schaum-Grenze kann festgestellt werden, daß eine Verminderung des Quarzgehaltes im Schaumprodukt durch Erhöhung des Fluoritausbringens bei konstantem Quarzausbringen eintritt. Die Positionierung und Geometrie der Rosteinbauten bestimmt also den Grad der Verminderung des Quarzausbringens (Trübemitföhrung). In der Trübe-Schaum-Grenze bewirkt der Rosttyp RC mit mittlerer Weite ($D_R/D_1 = 0,083$) und kleinerer Höhe ($H_R/D_1 = 0,10$) der Rostöffnungen die bessere Reduzierung des Quarzausbringens und erreicht geringere Quarzgehalte im Schaumprodukt. Der Rosttyp RB mit kleiner Weite ($D_R/D_1 = 0,033$) und mittlerer Höhe ($H_R/D_1 = 0,20$) der Rostöffnungen oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems föhrt zum niedrigsten Quarzausbringen und Quarzgehalt im Schaumprodukt und damit zur Reduzierung der Trübemitföhrung. Dies gilt nicht nur bei Positionierung oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems, sondern auch im Vergleich zu den Ergebnissen bei den Rosteinbauten in den anderen Positionen und gegenüber der Flotation ohne Anwendung eines Rostes.

Eine optimale Geometrie der Rosteinbauten zur Erreichung der Reduzierung der Trübemitföhrung ohne Abnahme des Wertstoffausbringens sollte die folgenden Bedingungen erfüllen:

- a) Erzeugung einer ruhigen, stabilen Schaumschicht entweder durch eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse im oberen Bereich der Zelle oder mittels eine Verminderung der durch die turbulenten Strömungsverhältnisse verursachten Schwankungsbewegungen der Trübe-Schaum-Grenze,

- b) Begünstigung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen durch eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse im oberen Bereich der Zelle, um das Wertstoffausbringen konstant zu halten oder zu erhöhen,
- c) Unterstützung des Zurückfließens hydrophiler Teilchen und der Schaumentwässerung,
- d) Angemessene Verzögerung oder Verminderung des Trübemassestromes in den Schaum, um einen Kurzschluß des Wassers und der hydrophilen Teilchen von der Trübezone zum Schaumprodukt zu vermeiden.

4.4.2.3 Einfluß der Änderung der Zellengeometrie mit Variation des Leistungseintrages

Die Untersuchungen des Einflusses der Änderungen der Zellengeometrie sind in drei unterschiedlichen Versuchsreihen erfolgt:

- a) Zellen mit konstanter Querschnittsfläche – mit $c_L = \text{const.}$ und $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$,
- b) Zellen mit konstantem Volumen – mit $c_L = \text{const.}$ und $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$,
- c) Zellen mit konstantem Volumen – mit $c_L = \text{const.}$ und P_{bt}/m_{bt} variabel.

In folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse entsprechend dieser Unterteilung präsentiert und erörtert und die Schlußfolgerungen zum Einsatz der Änderung der Zellengeometrie gezogen.

- a) *Zellen mit konstanter Querschnittsfläche – mit Luftströmungs-Zahl $c_L = \text{const.}$ und spezifischem Leistungseintrag $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$*

Bilder 4.28 und 4.29 zeigen den Einfluß der Änderung der Zellengeometrie durch Variation des H/D_1 -Verhältnisses bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt} sowie konstanter c_L unter den in Tabellen 3.7 und 3.8a und im Bild 3.8 genannten Bedingungen auf die Flotationsergebnisse. Die Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses führt wegen der erhöhten Flotationskinetik zu einer Verschlechterung der Trennergebnisse. Dies äußert sich im Vergleich zur Standardzelle darin, daß nicht nur eine Erhöhung des Fluoritausbringens, sondern zugleich eine Steigerung des Wasserausbringens, des Quarzausbringens, des Quarzgehaltes und somit des Trübemitführungsfaktors und des Verhältnisses R_{SiO_2}/R_{CaF_2} eintritt. Ursache dafür ist die durch $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$ und $c_L = \text{const.}$ bedingte Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L und Erhöhung der Rotordrehzahl n . Die gleichzeitige Erhöhung des Wertstoffausbringens und des Gehaltes an hydrophilen Teilchen bei zunehmendem H/D_1 -Verhältnis wurde auch von anderen Autoren bei der Untersuchung des Einflusses der Vergrößerung der Zellenhöhe bei konstanter Querschnittsfläche auf den Flotationserfolg bei Steinkohlen [179] und Kupfer-Erzen [230] experimentell bestätigt. Jedoch sind bei beiden Untersuchungen keine Angaben zu c_L und P_{bt}/m_{bt} gemacht worden.

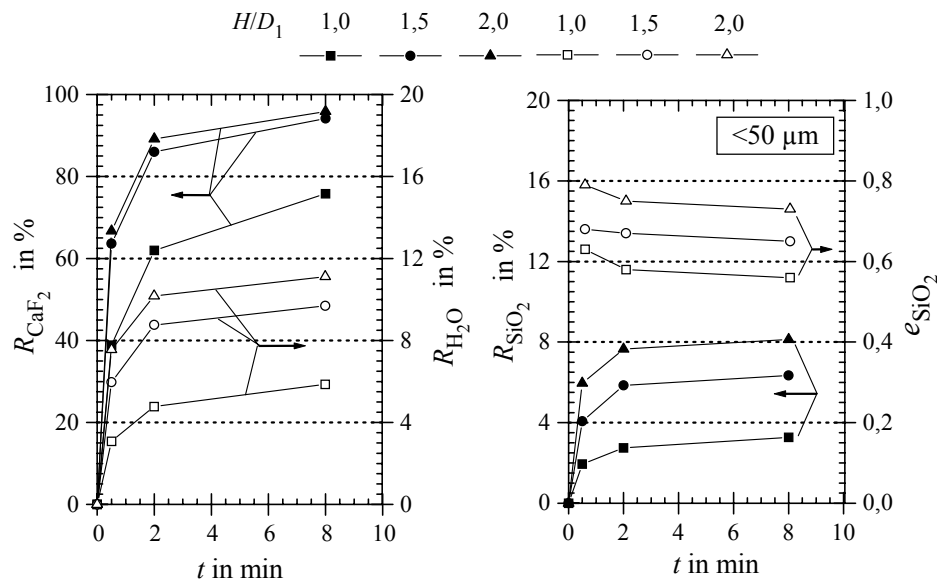


Bild 4.28: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf die Flotationskinetik

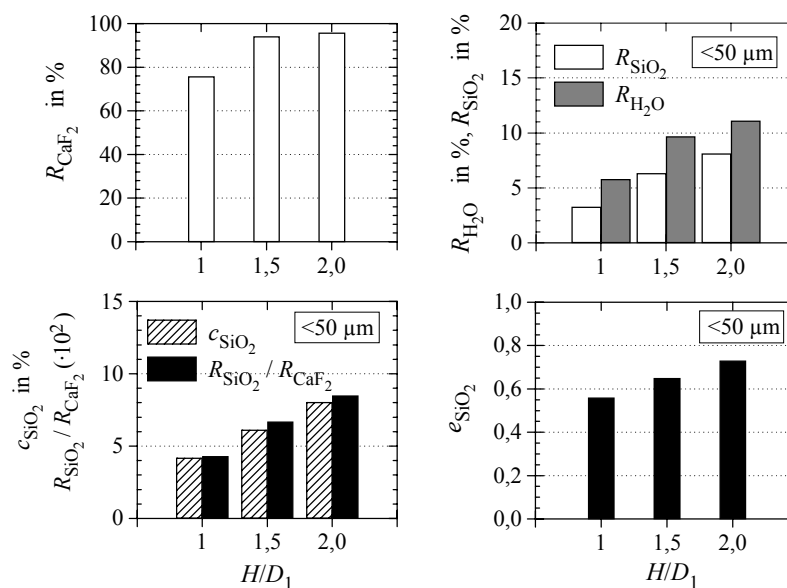


Bild 4.29: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf die Flotationsergebnisse bei der Flotationszeit $t = 8$ min

Die Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit führt einerseits zu der beobachteten Verschlechterung der Luftdispargierung und hat andererseits auch eine Erhöhung des Trübevolumenstromes in die Schaumlamellen (s. Bild 4.30) sowie eine Verminderung der Verweilzeit der Blasen im Schaum zur Folge, wie die in Tabelle 4.5 dargestellten experimentellen Werte zeigen. Dies beeinträchtigt die Schaumentwässerung und somit auch das Zurückfließen von durch Trübemitführung in den Schaum gelangten Teilchen. Dadurch werden der Quarzgehalt im Schaumprodukt und das Quarzausbringen durch die Trübemitführung erhöht (s. Bilder 4.28 und 4.29). Szatkowski [68] hat ebenfalls bei der Laborflotation von Steinkohle festgestellt, daß die Erhö-

hung der Luftleerrohrgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der hydrophilen Teilchen im Schaumprodukt (Asche) führt. Diesen negativen Wirkungen kann nur durch eine angemessene Reduzierung der Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L , d. h. auch der Luftströmungs-Zahl c_L , durch Erhöhung der Schaumhöhe (positive Wirkung der Schaumentwässerung und der mittleren Schaumverweilzeit) oder durch die Anwendung von Rosteinbauten (s. vorherigen Abschnitt: Verzögerung des Trübemassestromes, Verlangsamung der Flotationskinetik und Erzeugung einer stabilen Schaumschicht) begegnet werden. Außerdem kann auch die Erhöhung der Beladung der Blasenoberfläche mit hydrophoben Teilchen infolge steigender flotierbarer Feststoffmenge bei abnehmendem spezifischen Luftvolumenstrom (s. Tabelle 4.5) zu einer Verminderung der Blasenkoaleszenz in der Trübe-Schaum-Grenze führen. Dies könnte auch die Ursache für die Steigerung der Trübemitführung der hydrophilen Teilchen sein, weil die Blasenkoaleszenz in diesem Bereich von verschiedenen Autoren als ein sehr wichtiger Mechanismus zur Entfernung der hydrophilen Teilchen aus dem Trübevolumenstrom vor dem Eintritt in die Schaumzone angesehen wird [56, 68, 71, 78, 87].

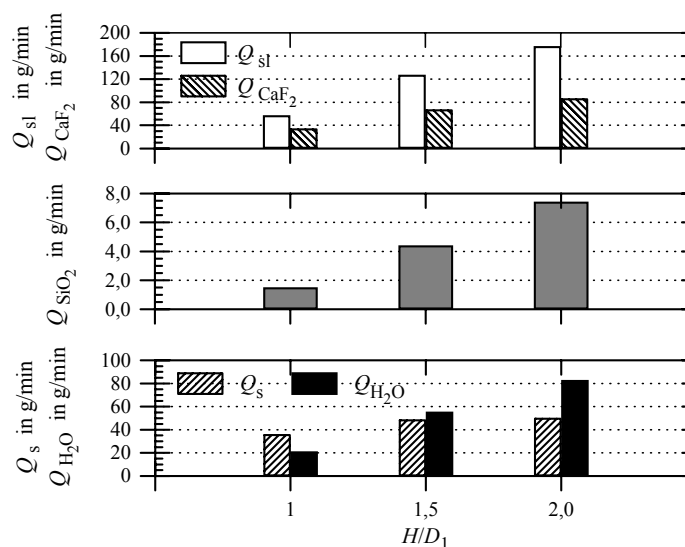


Bild 4.30: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf den mittleren Massestrom von Trübe, Fluorit, Quarz $< 50 \mu m$, Feststoffe und Wasser bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$

Die gleichzeitige Steigerung des Fluorit- und Quarzausbringens wird dann auch durch die bei $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$ und $c_L = \text{const.}$ bedingte Erhöhung der Rotordrehzahl hervorgerufen. Darüber hinaus ist bekannt, daß bei angemessener Erhöhung der Drehzahl das Wertstoffausbringen ansteigt. Normalerweise ist dies mit einer simultanen Verschlechterung der Konzentratqualität verbunden, wie *Ityokumbul u.a.* [59] bei der Flotation von feinem Pyrit in einer Flotationskolonne mit Agitation durch einen Rotor experimentell nachgewiesen haben.

Tabelle 4.5: Luftleerrohrgeschwindigkeiten und mittlere Schaumverweilzeiten bei den verwendeten Luftvolumenströmen in den Zellen mit konstanter Querschnittsfläche, Strömungs-Zahl (c_L) und konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt})

H/D_1 - Verhältnis	Luftvolumenstrom Q_L (cm ³ /s)	Spez. Luftvolumenstrom q_L (l Luft / (l Trübe · min))	Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Mittlere Schaum- verweilzeit τ_{sch}^* (s)
1,0	71	1,30	0,32	3,1
1,5	82	0,96	0,36	2,8
2,0	90	0,79	0,40	2,5

* $\tau_{sch} = H_{sch}/u_L$ mit $H_{sch} = 1,0$ cm und $A_Q = 225$ cm²

b) Zellen mit konstantem Volumen – mit Luftströmungs-Zahl $c_L = \text{const.}$ und spezifischem Leistungseintrag $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$

Bilder 4.31 und 4.32 stellen die Ergebnisse des Einflusses der Änderung der Zellengeometrie durch Variation des H/D_1 -Verhältnisses bei o. g. Versuchsreihe unter den in Tabellen 3.7 und 3.8a und im Bild 3.9 genannten Bedingungen auf die Flotationskinetik und –ergebnisse dar. Bei dieser Versuchsreihe sind die Konsequenzen aus $c_L = \text{const.}$ und $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$ bei zunehmenden H/D_1 -Verhältnis die Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit und Rotorumfangsgeschwindigkeit (s. Tabellen 3.8a und 4.6).

Die Tendenz dieser Ergebnisse im Vergleich zu den Zellen mit konstanter Querschnittsfläche bei zunehmendem H/D_1 -Verhältnis ist gleich, ja sogar noch verstärkt. Die Flotationskinetik, das Fluoritausbringen, das Quarzausbringen, der Quarzgehalt im Schaumprodukt sowie das Wasserausbringen sind im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Standardzelle und mit den Zellen bei konstanter Querschnittsfläche unter gleichen c_L - und P_{bt}/m_{bt} -Bedingungen angestiegen (vgl. Bilder 4.28, 4.29, 4.31 und 4.32). Deswegen lassen sich diese Ergebnisse wegen der gleichen Ursachen analog zu den Resultaten für Zellen mit konstanter Querschnittsfläche erklären. Das heißt, die Erklärung dafür ist auch auf die durch $c_L = \text{const.}$ und $P_{bt}/m_{bt} = \text{const.}$ bedingte Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit und Rotorumfangsgeschwindigkeit und ihre Wirkung auf die mittlere Schaumverweilzeit bzw. Flotationskinetik zurückzuführen. Jedoch stellt der Verlauf des Trübe mitführungsfaktors des Quarzes mit zunehmendem Verhältnis H/D_1 eine Ausnahme dar. Trotz der Erhöhung des Quarzausbringens, des Quarzgehalts im Schaumprodukt und des Wasserausbringens ist der Trübe mitführungsfaktor beim Verhältnis $H/D_1 = 2,8$ reduziert. Dies kann durch einen Kurzschluß bei der Wasserzugabe während der Versuche in Folge der Verminderung der Querschnittsfläche der Zelle erklärt werden (s. Bild 4.33). Die Ergebnisse zeigen weiterhin nochmals den Vorteil der Beschreibung der Trübe mitführung des Quarzes durch das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} . Dieses Verhältnis korreliert sehr gut mit der Erhöhung des Quarzausbringens und des Quarzgehalts im Schaumprodukt bei zunehmendem H/D_1 -Verhältnis.

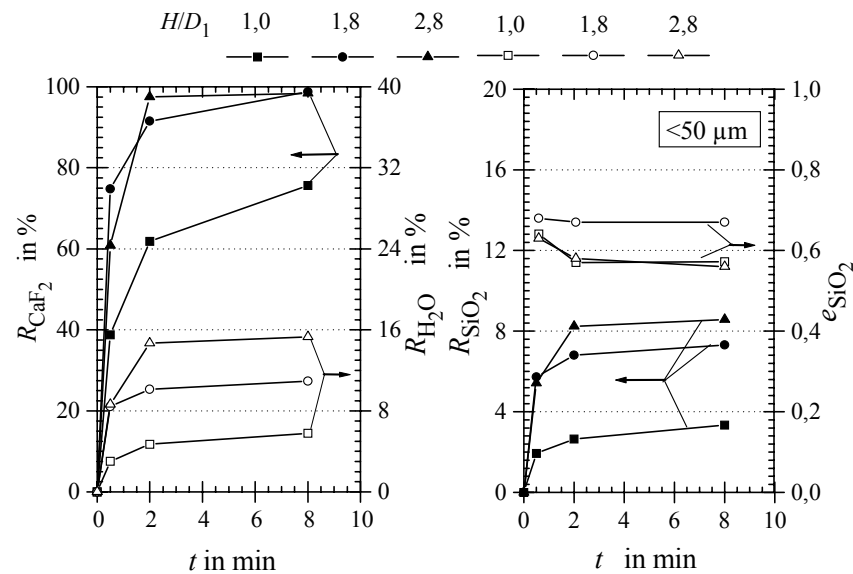


Bild 4.31: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstantem begastem Trübevolumen V_{bt} , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf die Flotationskinetik

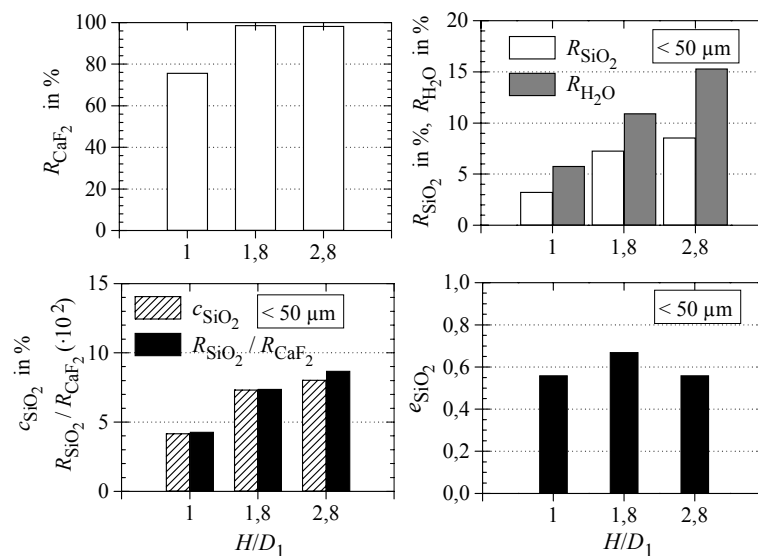


Bild 4.32: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstantem begastem Trübevolumen V_{bt} , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf die Flotationsergebnisse bei der Flotationszeit $t = 8$ min

Tabelle 4.6: Luftleerrohrgeschwindigkeiten und mittlere Schaumverweilzeiten bei den verwendeten Luftvolumenströmen in den Zellen mit konstantem begastem Trübevolumen, konstanter Strömungs-Zahl (c_L) und konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt})

H/D_1 - Verhältnis	Luftvolumen- strom Q_L (cm ³ /s)	Spez. Luftvolumenstrom q_L (l Luft / (l Trübe · min))	Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Mittlere Schaum- verweilzeit τ_{sch}^* (s)
1,0	71	1,30	0,32	3,1
1,8	56	0,98	0,36	2,8
2,8	46	0,80	0,39	2,6

* $\tau_{sch} = H_{sch}/u_L$; $H_{sch} = 1,0$ cm, $V_{bt} = 3,45 \pm 0,05$ l

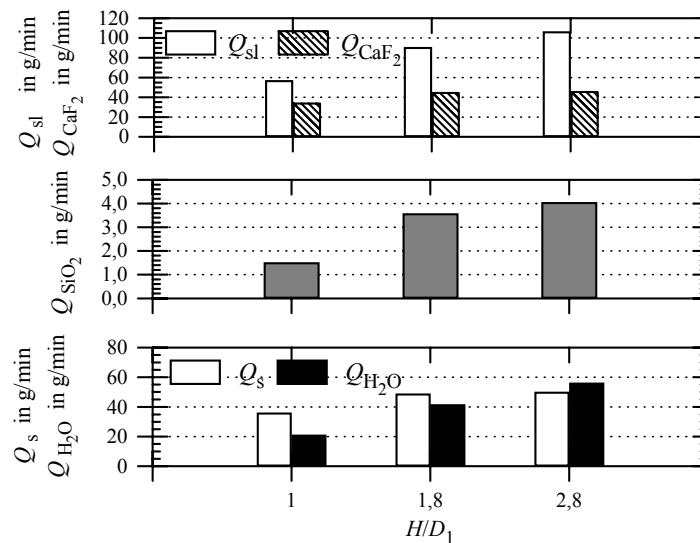


Bild 4.33: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf den mittleren Massestrom von Trübe, Fluorit, Quarz $<50 \mu m$, Feststoffe und Wasser bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$

c) Zellen mit konstantem Volumen – mit Luftströmungs-Zahl $c_L = \text{const.}$ und spezifischem Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt} variabel

In den Bildern 4.34 und 4.35 sind die Flotationsergebnisse der oben genannten Versuchsreihe zum Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei zunehmendem H/D_1 -Verhältnis und abnehmendem spezifischem Leistungseintrag sowie unter den in Tabellen 3.7 und 3.8b und im Bild 3.9 genannten Bedingungen dargestellt.

Eine Verbesserung der Trennergebnisse läßt sich durch Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses bei konstantem Volumen V_{bt} der begasten Trübe, konstanter Luftströmungs-Zahl sowie konstanter Rotordrehzahl und damit durch Verminderung der Rotorumfangsgeschwindigkeit (Verkleinerung des Rotordurchmessers) sowie durch Reduzierung des Leistungseintrages erreichen. Die Flotationszelle mit einem H/D_1 -Verhältnis von 2,8 liefert die besten Ergebnisse, weil hier das höchste Fluoritausbringen und das geringste Quarzausbringen sowie der kleinste Trübe mitführungsfaktor erzielt werden. Die Zelle mit einem H/D_1 -Verhältnis von 1,8 liefert das schlechteste Trennergebnis, da sie trotz des höheren Fluoritausbringens im Vergleich zur Standardzelle die stärkste Trübe mitführung von Quarz (R_{SiO_2} , e_{SiO_2}) hervorbringt. Die Erhöhung des Fluoritausbringens mit zunehmendem H/D_1 -Verhältnis bei konstantem Volumen V_{bt} der begasten Trübe kann auf günstigere hydrodynamische Bedingungen für die Flotation der größeren Teilchen zurückgeführt werden. Unter den in Tabellen 3.7 und 3.8b und Bild 3.9 genannten Bedingungen führt die Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses bei konstantem V_{bt} und verringertem Leistungseintrag zu größeren Blasen und einer geringeren turbulenten Beanspru-

chung der gebildeten Teilchen-Blase-Aggregate im Bereich oberhalb der Trübezone sowie zu einer stabilen Schaumschicht. Dadurch werden das Haften der groben Teilchen an den Blasen, die Stabilität der gebildeten Aggregate sowie deren Auftriebsvermögen begünstigt und damit das Fluoritausbringen erhöht.

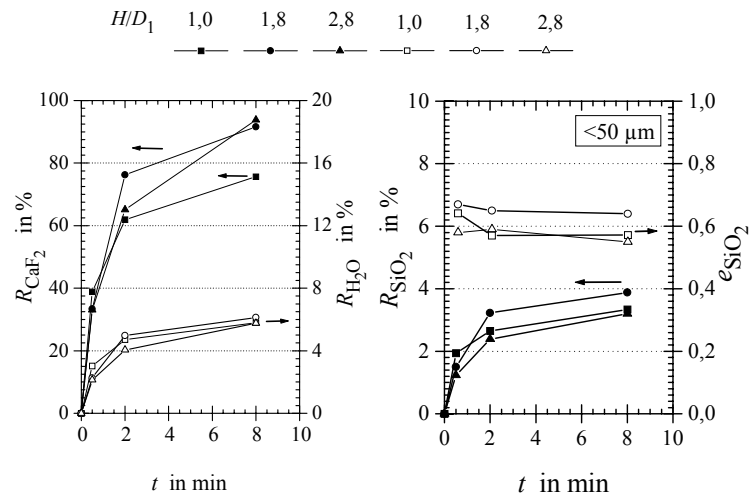


Bild 4.34: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstantem begastem Trübevolumen V_{bt} , konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) und abnehmendem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) auf die Flotationskinetik

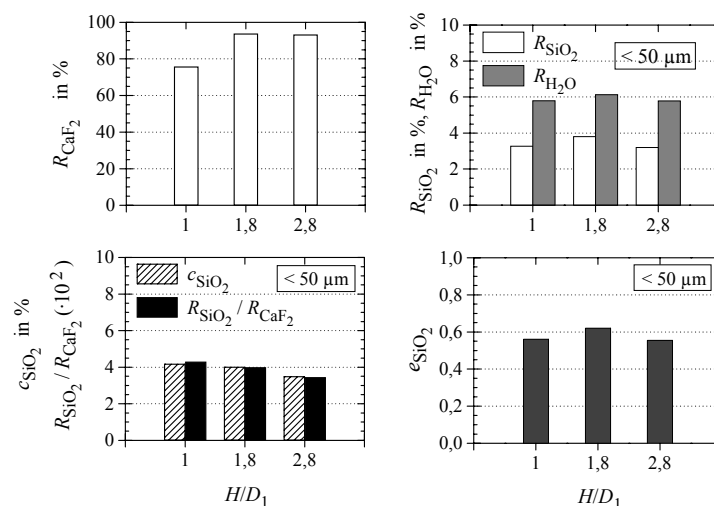


Bild 4.35: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstantem begastem Trübevolumen V_{bt} , konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) und abnehmendem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) auf die Flotationsergebnisse bei der Flotationszeit $t = 8$ min

Eine Reduzierung des Quarzausbringens, des Quarzgehaltes im Schaumprodukt, des Wasserausbringens und des R_{SiO_2}/R_{CaF_2} -Verhältnisses sowie des Trübemitführungsfaktors bei einem H/D_1 -Verhältnis von 2,8 sowie konstantem Trübevolumen resultiert aus der Verminderung der

Luftleerrohrgeschwindigkeit und Erhöhung der mittleren Schaumverweilzeit (Tabelle 4.7) und der Rotorumfangsgeschwindigkeit sowie des spezifischen Leistungseintrages (s. auch Tabelle 3.8b). Diese bewirken wegen der verzögerten Kinetik und der verbesserten Luftdispergierung eine Verlangsamung des Eintritts der Trübe in den Schaum sowie ihres Aufstiegs mit den Schaumlamellen. Dadurch entsteht eine stabilere Schaumschicht. Das Zurückfließen des Wassers sowie der Teilchen aus dem Schaum in die Trübe werden durch die Erhöhung der Luftverweilzeit im Schaum begünstigt.

Die Erhöhung der Kinetik bei einem H/D_1 -Verhältnis von 1,8 resultiert vermutlich aus der verursachten Luftdispergierung unter den in Tabellen 3.7 und 3.8b genannten Bedingungen. Die Konsequenzen aus diesen Bedingungen ($c_L = \text{const.}$, $n = \text{const.}$ und D_2 variabel) sind die Verminderung der Rotorumfangsgeschwindigkeit und des Luftdurchsatzes. Unter diesen Bedingungen entstehen vergleichsweise große Blasen. Hierbei wird infolge der Verminderung des spezifischen Luftvolumenstromes, der Blasenanzahl sowie der Vergrößerung des Abstandes zwischen dem Rotor-Stator-Strombrecher-System und der Trübe-Schaum-Grenze die Flotation der groben Teilchen begünstigt und eine Erhöhung der Feststoffbeladung der Blasen sowie eine höhere Bedeckung der Blasenoberfläche mit hydrophoben Teilchen erreicht. Folglich werden die Kinetik des Flotation und somit das Fluoritausbringen, das Wasserausbringen und das Quarzausbringen erhöht. Die Verbesserung der Konzentratqualität bei H/D_1 -Verhältnis von 1,8 im Vergleich zum Versuch ohne Rosteinbauten kann jedoch nicht durch die Verminderung des Quarzausbringens begründet werden. Sie ist vielmehr durch die gleichzeitig stärkere Erhöhung des Fluoritausbringens im Vergleich zum Quarzausbringen im Schaumprodukt erklärbar. Damit sind der Quarzgehalt im Schaumprodukt und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ trotz der Vergrößerung des Quarzausbringens und einer geringfügigen Erhöhung des mittleren Quarzmassenstromes vermindert.

Tabelle 4.7: Luftleerrohrgeschwindigkeiten und mittlere Schaumverweilzeit bei den verwendeten Luftvolumenströmen in den Zellen mit konstantem begasten Trübevolumen, konstanter Strömungs-Zahl (c_L) und abnehmendem spezifischen Leistungseintrag ($P_{\text{bt}}/m_{\text{bt}}$)

H/D_1 - Verhältnis	Luftvolumenstrom Q_L (cm ³ /s)	Spez. Luftvolumenstrom q_L (l Luft / (l Trübe · min))	Luftleerrohrgeschwindigkeit u_L (cm/s)	Mittlere Schaum- verweilzeit τ_{sch}^* (s)
1,0	71	1,30	0,32	3,1
1,8	42	0,70	0,27	3,7
2,8	28	0,50	0,24	4,2

* $\tau_{\text{sch}} = H_{\text{sch}}/u_L$; $H_{\text{sch}} = 1,0$ cm, $V_{\text{bt}} = 3,45 \pm 0,05$ l

Aus dem Bild 4.35 ist deutlich zu erkennen, daß das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ mit dem Quarzgehalt im Schaumprodukt korreliert, während der Trübemitführungsfaktor gut mit dem Quarzausbringen und dem Wasserausbringen übereinstimmt.

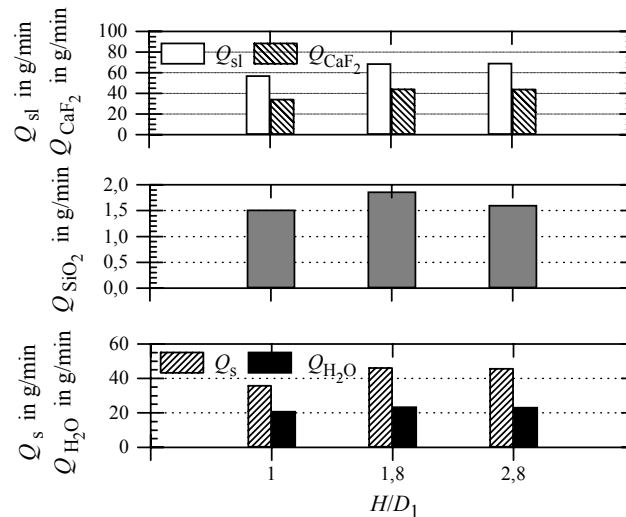


Bild 4.36: Einfluß der Änderung der Zellengeometrie bei konstanter Querschnittsfläche A_Q , konstantem spezifischen Leistungseintrag (P_{bt}/m_{bt}) und konstanter Luftströmungs-Zahl (c_L) auf den mittleren Massestrom von Trübe, Fluorit, Quarz $<50 \mu m$, Feststoffe und Wasser bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$

d) Schlußfolgerungen aus den Untersuchungen zum Einfluß der Änderung der Zellengeometrie

Aus den vorliegenden Ergebnissen zum Einfluß der Änderung der Zellengeometrie kann geschlußfolgert werden:

- i. Die beiden Varianten der Änderungen der Zellengeometrie bei konstanter Luftströmungs-Zahl und konstantem spezifischen Leistungseintrag führen zu einer Erhöhung der Trübe-mitführung, des Wertstoff- und Wasserausbringens im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Standardzelle. Außerdem kann man bei diesen beiden Varianten deutlich erkennen, daß die Luftleerrohrgeschwindigkeit sowie Rotorumfangsgeschwindigkeit und ihre Wirkung auf die mittlere Schaumverweilzeit bzw. Flotationskinetik eine bestimmende Rolle für die Erhöhung der Trübe-mitführung spielen. Bei diesen beiden Varianten ist die mittlere Schaumverweilzeit wegen der zunehmenden Luftleerrohrgeschwindigkeit vermindert (vgl. Tabellen 4.5 und 4.6) und die Flotationskinetik wegen der wachsenden Luftleerrohr-geschwindigkeit und Rotorumfangsgeschwindigkeit gestiegen (s. Bilder 4.28 und 4.31). Damit sind die Bedingungen zur Erhöhung des Ausbringens von Fluorit, Wasser und Quarz (Trübe-mitführung) gegeben. Die Steigerung der Flotationskinetik mit zunehmendem H/D_1 -Verhältnis führt zu einer Erhöhung der Trübe-mitführung der hydrophilen Teilchen, weil die Schaumentwässerung und das Zurückfließen von hydrophilen Teilchen durch den schnellen Aufstieg der Fluorit-Blase-Aggregate in die Schaumzone und das Schaumprodukt beeinträchtigt werden. Deshalb ist diese nachteilige Wirkung der zunehmenden Luftleerrohrgeschwindigkeit und Rotorumfangsgeschwindigkeit zurückzudrän-

gen, um eine Reduzierung der Trübemithführung und eine Verbesserung der Trennergebnisse zu erreichen. Das kann durch folgende Maßnahmen geschehen:

- eine angemessene Reduzierung des Luftvolumenstromes und eine Erhöhung der Schaumhöhe, die zu einer Vergrößerung der mittleren Schaumverweilzeit führt, ohne das Wertstoffausbringen zu beeinträchtigen (Reduzierung der Trübemithführung durch die Begünstigung der Schaumentwässerung und des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen) und
 - eine Verzögerung der Flotationskinetik (angemessene Verminderung des Trübevolumenstromes ins Schaumprodukt), aber ohne Behinderung des Aufsteigens der feststoffbeladenen Blasen durch die Anwendung der Rosteinbauten, wie im vorherigen Abschnitt festgestellt wurde; dies soll zu einer langsameren und gleichmäßigeren Verteilung des Ausbringens über die Gesamtflotationszeit führen, gleichzeitig einen stabilen Schaum erzeugen und günstige Bedingungen für die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen und des Wassers gewährleisten.
- ii. Eine Verminderung der Trübemithführung bei Erhöhung des Wertstoffausbringens mit zunehmendem H/D_1 -Verhältnis bei konstantem begasten Trübevolumen wird nur dann erreicht, wenn gleichzeitig folgende Bedingungen erfüllt sind:
- niedriger Leistungseintrag im Vergleich zu Zellen mit einem herkömmlichen H/D_1 -Verhältnis (z.B. durch die Einstellung der Rotorumfangsgeschwindigkeit nahe dem Bereich des 1s-Kriteriums),
 - eine niedrige Luftleerrohrgeschwindigkeit, um die mittlere Schaumverweilzeit zu vergrößern (Begünstigung der Schaumentwässerung und des Zurückfließens der hydrophilen Teilchen sowie des Wassers in die Trübe),
 - Verlangsamung der Flotationskinetik infolge der beiden vorgenannten Bedingungen und durch eine Verzögerung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen (gleichmäßige Verteilung des Ausbringens über die Gesamtflotationszeit, Beruhigung des Trübevolumens im Bereich direkt unterhalb der Schaumzone sowie Erzeugung einer stabilen Schaumzone und einer angemessenen Verminderung des mittleren Massestromes von hydrophilen Teilchen, Wasser und Trübe in die Schaumzone und das Schaumprodukt); dies könnte durch die Anwendung von Rosteinbauten, wie im Abschnitt 4.4.2.2 gezeigt wurde, erreicht werden.

Außerdem ist zu bemerken, daß die Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses bei einem konstanten Trübevolumen zu einer schlankeren Zelle führt, die sich näherungsweise wie eine Flotationskolonne mit Rotor verhält. Bei einer Flotationskolonne mit Rotor haben *Ityokumbul u. a.*

[59] festgestellt, daß der maximale spezifische Leistungseintrag für die selektive Trennung des feinen Pyrits $<0,3 \text{ kW/m}^3$ beträgt und die Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit zu einer Verminderung der Selektivität und einer Erhöhung des Wertstoffausbringens des Flotationsprozesses führt. Höhere spezifische Leistungseinträge durch die Erhöhung der Rotordrehzahl verursachten eine Verminderung der Selektivität infolge der verstärkten Trübe mitführung. Diese Ergebnisse stimmen mit den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Resultaten überein, wobei für eine Verbesserung der Flotationsergebnisse einem Leistungseintrag von $0,44 \text{ kW/m}^3$ und einer Luftleerrohrgeschwindigkeit von $0,24 \text{ cm/s}$ eingestellt werden müssen.

4.4.2.4 Einfluß der synergetischen Wirkung der Kombination der Änderung der Zellengeometrie mit Anwendung von Rosteinbauten

Um negative Wirkungen auf die Trübe mitführung infolge der Erhöhung der Luftleerrohrgeschwindigkeit, des Aufstiegs der feststoffbeladenen Blasen und der Flotationskinetik entgegen zu wirken, wurden auch unterschiedliche Roste in der Trübe-Schaum-Grenze in einer Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 2,8 und konstantem begasten Trübevolumen eingebaut. Bei diesen Versuchen wurde die Luftströmungs-Zahl ($c_L = 0,080$), der spezifische Leistungseintrag ($P_{bt}/m_{bt} 0,36 \pm 0,01 \text{ W/kg}$), die Luftleerrohrgeschwindigkeit ($0,63 \text{ cm/s}$) und die mittlere Schaumverweilzeit ($\tau_{sch} = 1,6 \text{ s}$) konstant gehalten. Die anderen verwendeten Bedingungen sind in den Tabellen 3.4 und 3.7 wiedergegeben. Die Ergebnisse sind in den Bildern 4.37, 4.38 und 4.39 dargestellt.

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, daß die Anwendung von Rosteinbauten (RI und RJ) eine positive Wirkung auf die Trennschärfe und Selektivität der Flotation hat. Diese Roste führen zu einer Verminderung der Trübe mitführung (R_{SiO_2} , e_{SiO_2} , R_{SiO_2}/R_{CaF_2}) und des Quarzgehalts im Schaumprodukt (c_{SiO_2}) im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Rosteinbauten bei der Zelle mit $H/D_1 = 2,8$ und zu den besten Flotationsergebnissen, die bis jetzt mit der Standardzelle mit und ohne Einbauten erreicht wurden. Die Verminderung des Trübe mitführungsfaktors bzw. R_{SiO_2}/R_{CaF_2} -Verhältnisses und die Verbesserung der Konzentratqualität durch Anwendung der RI und RJ wird nicht nur durch etwaige Erhöhung des Fluoritausbringens und –massesstromes (Rosttyp RJ), sondern auch durch die Verminderung oder Verlangsamung der Flotationskinetik durch die Verzögerung des Aufstiegs der feststoffbeladenen Blasen und die Herstellung einer stabilen Grenzfläche Trübe/Schaumzone verursacht (s. Bilder 4.38 und 4.39). Der Rost RI erzeugt ein etwas kleineres Wasser- und Quarzausbringen, geringen Quarzgehalt und –massestrom als der Rosttyp RJ. Dagegen ist das Fluoritausbringen bei letzterem Rost deutlich größer (vgl. Bilder 4.37 und 4.38). Beim Rosttyp RH ergeben sich die schlechtesten Flotationsergebnisse, weil er trotz des verminderten Trübe-, Wasser- und Quarz-

massestromes das geringste Fluoritausbringen und die höchsten Werte für den Quarzgehalt im Schaumprodukt, den Trübeimführungsfaktor und das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ liefert.

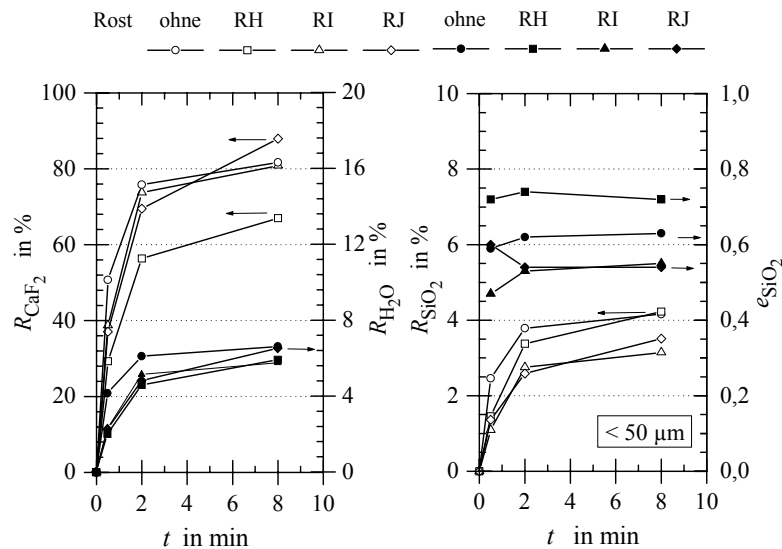


Bild 4.37: Einfluß der synergetischen Wirkung der Anwendung der Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie auf die Flotationskinetik (bei $H/D_1 = 2,8$, konstantem begasten Trübevolumen V_{bt} und konstantem spezifischen Leistungseintrag $P_{\text{bt}}/m_{\text{bt}}$)

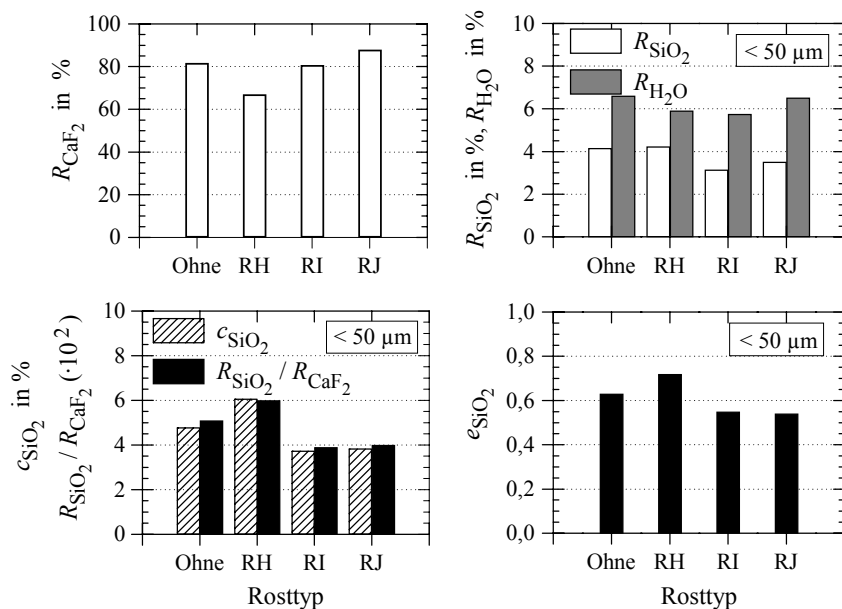


Bild 4.38: Einfluß der synergetischen Wirkung der Anwendung der Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie auf die Flotationsergebnisse bei der Flotationszeit $t = 8$ min (bei $H/D_1 = 2,8$, konstantem begasten Trübevolumen V_{bt} und konstantem spezifischen Leistungseintrag $P_{\text{bt}}/m_{\text{bt}}$)

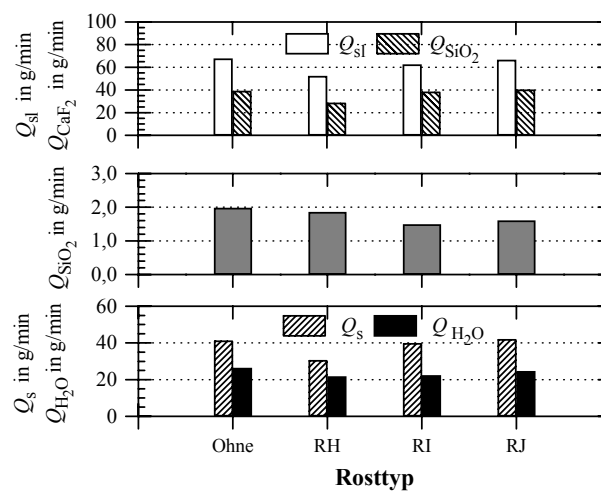


BILD 4.39: Einfluß der synergetischen Wirkung der Anwendung der Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie auf den mittleren Massestrom von Trübe, Fluorit, Quarz $<50 \mu m$, Feststoffe und Wasser bei der Flotationszeit $t = 8 \text{ min}$ (bei $H/D_1 = 2,8$, konstantem begastem Trübevolumen V_{bt} und konstantem spezifischen Leistungseintrag P_{bt}/m_{bt})

Die Beeinflussung der Flotationsergebnisse und der Kinetik bei Anwendung der Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie sind auch auf die Änderungen der Abmessung der Rosteinbauten zurückzuführen. Bei kleiner Weite und großer Höhe der Rostöffnungen (Rosttyp RH: $D_R/D_1 = 0,046$ und $H_R/D_1 = 0,46$) ist der Aufstieg der feststoffbeladenen Blasen von der Trübezzone in die Schaumzone am stärksten verzögert, die Schwankungen der Trübe-Schaum-Grenze stark gedämpft und das Zurückfließen von hydrophilen Teilchen und Wasser behindert. Folglich ist die Flotationskinetik des Fluorits stark reduziert und somit der Massestrom der Trübe, der Feststoffe, des Wassers und des Fluorits vermindert worden. Bei mittlerer Weite und Höhe der Rostöffnungen (Rosttyp RI: $D_R/D_1 = 0,116$ und $H_R/D_1 = 0,28$) wird der Aufstieg der feststoffbeladenen Blasen optimal verzögert und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen und des Wassers am wenigsten verhindert, wie die Verminderung des Massestromes von Quarz und Wasser bestätigt (s. Bild 4.39). Damit werden im Vergleich zur Flotation ohne Anwendung von Rosteinbauten das Quarz- und Wasserausbringen, der Quarzgehalt der Konzentrat, der Trübe mitführungsfaktor und das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} vermindert und das Fluoritausbringen konstant gehalten. Bei mittlerer Weite und großer Höhe der Rostöffnungen (Rosttyp RJ: $D_R/D_1 = 0,116$ und $H_R/D_1 = 0,46$) werden etwa gleiche Ergebnisse wie beim Rosttyp RI erzielt. Jedoch hat der Rosttyp RJ eine besondere Wirkung auf die Kinetik des Fluorit-, Quarz- und Wasserausbringens gezeigt. Das führt zu einer Verlangsamung und gleichmäßigere Verteilung des Ausbringens in der gesamten Flotationszeit. Folglich kann bei diesem Rosttyp (RJ) von einer Erhöhung des Fluoritausbringens bei einem konstanten Quarzgehalt im

Schaumprodukt, Trübe mitführungsfaktor und Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$ im Vergleich zum Rosttyp RI ausgegangen werden. Die geringe Erhöhung des Wasserausbringens im Vergleich zum Rosttyp RI kann versuchsbedingt, d.h. durch Kurzschlüsse des Zugabewassers während der Durchführung der Flotationsversuche, erklärt werden.

Aus diesen Ergebnissen über den Einfluß der synergetischen Wirkung von Rosteinbauten und Änderung der Zellengeometrie bei einer Zelle mit konstantem begastem Trübevolumen, die schmaler als die herkömmlichen Flotationsapparate ist ($H/D_1 = 2,8$), kann die im vorangegangenen Abschnitt genannte Möglichkeit zur Verminderung der Trübe mitführung ohne Wertstoffausbringungsverlust oder sogar mit Erhöhung des Wertstoffausbringens bestätigt werden. Aber nur Roste mit mittleren Weiten und Höhen der Rostöffnungen können gleichzeitig zu einer günstigeren Verzögerung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen, zu einer stabilen Trübe-Schaum-Grenze, zu einer Verlangsamung und einem gleichmäßigeren Ausbringen über die Gesamtflotationszeit und zu günstigeren Bedingungen für die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen führen.

4.4.2.5 Turbulenzmessungen in Zellen mit einem Verhältnis- $H/D_1 = 1,0$ und $2,8$

Mit diesen Untersuchungen soll überprüft werden, ob eine Vergrößerung des Verhältnisses H/D_1 tatsächlich zu einer Reduzierung der Turbulenz im Bereich direkt unterhalb der Schaumzone führt und damit die Hypothese diese Reduzierung als Ursache der Verminderung der Trübe mitführung bestätigt werden kann. Die untersuchten Zellen weisen ein Verhältnis- H/D_1 von 1,0 und 2,8 auf, weil diese eine deutliche Verminderung der Trübe mitführung erzeugt haben. Die Änderung der turbulenten Strömung wird durch den mittleren Effektivwert der Schwankungsgeschwindigkeit oder durch das dimensionslose Verhältnis zwischen dem mittleren Effektivwert der Schwankungsgeschwindigkeit und der Rotorumfangsgeschwindigkeit bewertet.

Die Ergebnisse der Messungen der zeitlich mittleren Strömungsgeschwindigkeit (\bar{u}_1) und der mittleren Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit ($\sqrt{u_1'^2}$) an unterschiedlichen Meßorten der Flotationszelle mittels Ultraschall-Doppler-Meßgerät sind in den Tabellen 4.8 bis 4.10 dargestellt. Tabelle 4.8 gibt die Meßergebnisse in Ein- und Zweiphasenströmungen ohne Feststoff für die Zelle mit einem H/D_1 -Verhältnis von 1,0 wieder. Tabelle 4.9 faßt die Resultate der Messungen in Zweiphasenströmungen fest-flüssig für Zellen mit einem H/D_1 -Verhältnis von 1,0 und 2,8 zusammen. Die Messungen in der Dreiphasenströmung fest-flüssig-gasförmig sind für die Zellen mit einem H/D_1 -Verhältnis von 1,0 und 2,8 in Tabelle 4.10 veranschaulicht. Die Beschreibung der Meßorte erfolgt bereits im Bild 3.10 und in Tabelle 3.11 im Abschnitt 3.2.2.5. Bei der Bestimmung der Richtung der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit

ist ein kartesisches Koordinatensystem mit gleicher Orientierung wie zur Beschreibung der Meßorte sowie der Meßort als Ursprung des Koordinatensystems verwendet worden.

Tabelle 4.8: Turbulenzparameter in Einphasenströmungen (destilliertes Wasser mit Streuteilchen) und Zweiphasenströmungen flüssig-gasförmig an unterschiedlichen Meßorten (s. Abschnitt 3.2.2.5) in der Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 1,0 ($H = 152$ mm, Rotorumfangsgeschwindigkeit: $u_R = 2491$ mm/s)

a) Ohne Luftzuführung und Schäumerzugabe											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}'^2}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x'^2}$	$\sqrt{u_y'^2}$	$\sqrt{u_z'^2}$	$\sqrt{u_{xyz}'^2}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-74	46	-26	87	148	92	65	93	99	114	0,046
B2o	-21	-72	14	75	-106	89	79	73	43	116	0,047
C1o	-	-	139	139	0,0	0,0	-	-	62	62	0,025
C1m	-	-	-0,2	-0,2	0,0	180	-	-	16	16	0,006
C1u	-	-	114	114	0,0	0,0	-	-	61	61	0,025
b) Mit Luftzuführung (Luftvolumenstrom $Q_L = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$) und ohne Schäumerzugabe											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}'^2}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x'^2}$	$\sqrt{u_y'^2}$	$\sqrt{u_z'^2}$	$\sqrt{u_{xyz}'^2}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-38	115	64	138	108	62	64	68	67	115	0,046
B2o	-97	34	29	107	160	74	50	76	60	109	0,044
C1o	-	-	163	163	0,0	0,0	-	-	64	64	0,026
C1m	-	-	360	360	0,0	0,0	-	-	80	80	0,032
C1u	-	-	316	316	0,0	0,0	-	-	43	43	0,017
c) Mit Luftzuführung (Luftvolumenstrom $Q_L = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$) und Schäumerzugabe											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}'^2}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x'^2}$	$\sqrt{u_y'^2}$	$\sqrt{u_z'^2}$	$\sqrt{u_{xyz}'^2}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-15	48	52	73	108	44	34	44	35	66	0,026
B2o	-60	33	24	73	151	71	30	50	34	67	0,027
C1o	-	-	132	132	0,0	0,0	-	-	51	51	0,020
C1m	-	-	196	196	0,0	0,0	-	-	51	51	0,021
C1u	-	-	215	215	0,0	0,0	-	-	55	55	0,022

Aus Tabelle 4.8 geht hervor, daß die Luftzuführung ohne Schäumerzugabe besonders bei den Meßorten C1o, C1m und C1u zu einer Erhöhung der senkrechten Komponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (\bar{u}_z) und der Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit $\sqrt{u_z'^2}$

(im Vergleich zur Einphasenströmung (Wasser + Streuteilchen)) führt. Der Betrag der resultierenden mittleren Effektivwerte der Schwankungsbewegung ist im oberen Bereich der Trübezone nahezu konstant geblieben. Die Richtung der resultierenden zeitlichen Strömungsgeschwindigkeit wird mit Luftzuführung im oberen Bereich der Trübezone stark verändert (A2o, B2o). Bei Luftzuführung ist die Resultierende der mittleren Geschwindigkeit nach oben gerichtet. Ohne Luftzufuhr zeigt sie dagegen nach unten oder mit geringer Abweichung von der Waagerechten leicht nach oben. Daraus ergibt sich die Frage, ob die Geschwindigkeit der Blasen oder der Strömung erfaßt wurde, weil die erzeugten Blasen ohne Schäumerzugabe relativ groß sind und wegen ihrer großen Auftriebsgeschwindigkeit nicht der turbulenten Fluidströmung ohne Schlupf folgen. Trotz dieses Meßproblems und der Dämpfung der Ultraschallausbreitung durch die Blasen (unterschiedliche Ultraschallgeschwindigkeit in Luft und in Flüssigkeiten) liefert diese Methode bei Messung nahe des Rotorstrahles (C1u) die gleiche Tendenz der Ergebnisse für Richtung und Betrag der zeitlich gemittelten Strömungsgeschwindigkeit und der Effektivwerte der Schwankungsbewegung wie die Resultate anderer Autoren mit anderen Meßtechniken in der Flotationszelle bei nahezu gleichem Meßort [16,17, 183, 185, 187, 191, 193, 216].

Weiterhin ist zu erkennen, daß die Luftzuführung bei Schäumerzusatz und ohne Anwesenheit der Feststoffe eine Verminderung der mittleren Geschwindigkeit und der Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit hervorruft. Hierbei wirkt die gasförmige Phase dämpfend auf die Turbulenz (vgl. Tabelle 4.8). Jedoch liegen die Werte der senkrechten Komponenten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Effektivwerte im Vergleich zum Einphasensystem (Wasser ohne Feststoff) höher. Die Ergebnisse weisen die Möglichkeit der Reduzierung der Trübe mitführung durch die Verzögerung der senkrechten Komponenten der mittleren Strömungsgeschwindigkeit auf. Dies kann durch Anwendung der Rosteinbauten erreicht werden.

Von *Bischofberger* [183] sind Untersuchungen mit einer Piezosonde zum Einfluß der Luft (ohne Anwesenheit eines Feststoffs) auf die Turbulenzparameter bekannt. Dieser Autor stellte ebenfalls eine Dämpfung der Turbulenz durch Luftzuführung fest.

Aus Tabelle 4.9 wird der Einfluß der Zellengeometrie auf die Turbulenzparameter in einem Zweiphasensystem fest-flüssig für verschiedene Meßorte ersichtlich. In einer Zelle mit einem Verhältnis $H/D_1 = 2,8$ und bei konstantem Trübevolumen tritt im Vergleich zur Standardzelle ($H/D_1 = 1,0$) eine Verminderung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit ein, besonders im oberen Bereich der Trübezone direkt unter der Schaumzone (Meßorte A2o, A3o, B3o, C3o). Diese Ergebnisse bestätigen die theoretische Überlegung zur Reduzierung der Turbulenzintensität im Oberteil der Trübezone durch eine

Erhöhung des Verhältnisses H/D_1 . Weiterhin ist im oberen Bereich der Trübezone eine starke Reduzierung der vertikalen Komponenten der beiden Geschwindigkeiten aufgetreten – insbesondere bei den Effektivwerten der Schwankungsgeschwindigkeit in der Flotationszelle mit $H/D_1 = 2,8$. Im Vergleich zum Einphasensystem und zum Zweiphasensystem flüssig-gasförmig sind die Werte für die mittlere Geschwindigkeit und turbulente Schwankungsgeschwindigkeit bei der Zelle mit einem Verhältnis $H/D_1 = 1,0$ im Zweiphasensystem festflüssig höher. Diese Erhöhung der Turbulenzintensität kann vermutlich durch die nicht vollausgebildete freie Turbulenz in den verwendeten Flotationsapparaten ($V_{bt} = 3,45$ l) erklärt werden [1, 183].

Tabelle 4.9: Einfluß der Zellengeometrie auf die Turbulenzparameter in Zweiphasenströmungen festflüssig an unterschiedlichen Meßorten (s. Abschnitt 3.2.2.5) in der Flotationszelle

a) Zellen mit dem H/D_1 -Verhältnis von 1,0 und Rotorumfangsgeschwindigkeit: $u_R = 2491$ mm/s											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}'^2}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x'^2}$	$\sqrt{u_y'^2}$	$\sqrt{u_z'^2}$	$\sqrt{u_{xyz}'^2}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-95	31	-104	144	162	136	54	97	57	125	0,050
B3o	-71	-102	8,6	124	-125	86	99	54	63	106	0,043
B2o	-49	-107	18	119	-115	81	67	55	71	113	0,045
B2m	-24	-19	29	42	-141	46	81	83	80	141	0,057
B2u	-73	-41	15	85	-151	79	110	90	101	174	0,071
C1o	-	-	176	175	0,0	0,0	-	-	68	68	0,027
C1m	-	-	353	353	0,0	0,0	-	-	83	83	0,033
C1u	-	-	291	291	0,0	0,0	-	-	43	43	0,017
b) Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 2,8 und Rotorumfangsgeschwindigkeit $u_R = 1812$ mm/s											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}'^2}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x'^2}$	$\sqrt{u_y'^2}$	$\sqrt{u_z'^2}$	$\sqrt{u_{xyz}'^2}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-1,2	-1,8	-1,3	1,3	-123	171	2,2	3,6	10	11	0,006
B3o	-5,2	-1,4	-7,3	9,1	-165	143	6,3	2,2	9,2	11	0,006
B2o	-3,4	-1,6	0,8	3,9	-155	78	2,7	2,1	5,3	6,3	0,003
B2m	-28	23	-19	41	141	117	12	13	14	23	0,013
B2u	-24	-231	-102	254	-96	114	38	71	43	91	0,050
C1o	-	-	-0,8	-0,8	0,0	180	-	-	1,6	1,6	0,001
C1m	-	-	18	18	0,0	0,0	-	-	15	15	0,008
C1u	-	-	77	77	0,0	0,0	-	-	24	24	0,013

Zur Bewertung dieser Messungsergebnisse muß man jedoch auch beachten, daß eine Erhöhung des Meßfehlers bei der Zelle mit einem H/D_1 -Verhältnis von 2,8 in Zweiphasenströ-

mungen gasförmig-flüssig auftreten kann, weil die geringe Strömungsgeschwindigkeit und mittlere Schwankungsgeschwindigkeit im Oberteil der Trübezone unter bzw. nahe der Grenze der maximalen Auflösung des Geschwindigkeitswertes des benutzten Meßgerätes liegt. Bei den verwendeten Meßbedingungen beträgt die maximale Auflösung der Geschwindigkeit 2,59 mm/s für die x - und y -Komponenten und 3,70 mm/s für z -Komponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit.

Tabelle 4.10: Einfluß der Zellengeometrie auf die Turbulenzparameter in Dreiphasenströmungen fest-gasförmig-flüssig an unterschiedlichen Meßorten (s. Abschnitt 3.2.2.5) in der Flotationszelle

a) Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 1,0 (Luftvolumenstrom $Q_L = 70 \text{ cm}^3/\text{s}$ und Rotorumfangsgeschwindigkeit $u_R = 2491 \text{ mm/s}$)											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}^{\prime 2}}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_y^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_z^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_{xyz}^{\prime 2}}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-64	62	120	150	139	37	54	50	54	92	0,037
B3o	-112	-8,8	30	117	-175	75	42	53	39	78	0,031
B2o	-122	21	36	129	170	74	44	72	47	97	0,039
B2m	-83	-35	101	135	-157	42	55	63	44	95	0,037
B2u	70	51	128	154	36	34	63	60	41	99	0,040
C1o	-	-	201	201	0,0	0,0	-	-	59	59	0,024
C1m	-	-	384	384	0,0	0,0	-	-	50	50	0,020
C1u	-	-	369	369	0,0	0,0	-	-	46	46	0,018
b) Zelle mit H/D_1 -Verhältnis von 2,8 (Luftvolumenstrom $Q_L = 27,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ und Rotorumfangsgeschwindigkeit $u_R = 1812 \text{ mm/s}$)											
Meßort	Mittlere Strömungsgeschwindigkeiten						Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit				$\frac{\sqrt{u_{xyz}^{\prime 2}}}{u_R}$
Abk.	\bar{u}_x	\bar{u}_y	\bar{u}_z	\bar{u}_{xyz}			$\sqrt{u_x^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_y^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_z^{\prime 2}}$	$\sqrt{u_{xyz}^{\prime 2}}$	
				\bar{u}_{xyz}	$\theta_{xy/x}$	$\beta_{xyz/z}$					
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	Grad	Grad	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
A2o	-30	-2,6	135	138	-175	12	39	28	39	61,9	0,034
B3o	-73	-38	97	127	-152	40	42	39	34	66,8	0,037
B2o	-39	-4,4	110	117	-173	20	42	36	38	67,4	0,037
B2m	11	16	177	178	57	6,0	61	62	30	91,7	0,051
B2u	41	-161	185	249	-76	42	43	67	39	88,2	0,049
C1o	-	-	98	98	0,0	0,0	-	-	37	37,5	0,021
C1m	-	-	240	240	0,0	0,0	-	-	27	27,5	0,015
C1u	-	-	198	198	0,0	0,0	-	-	55	55,5	0,030

Tabelle 4.10 zeigt den Einfluß der Zellengeometrie für ein Dreiphasensystem fest-flüssig-gasförmig und verschiedene Meßorte in der Zelle auf die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, die Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit und die dimensionslosen Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit. Die Luftzuführung hat in Abhängigkeit von dem H/D_1 -

Verhältnis der Zellen unterschiedliche Auswirkungen auf die Turbulenzparameter. Bei den Zellen mit einem Verhältnis $H/D_1 = 1,0$ sind im Vergleich zu Zweiphasenströmungen festflüssig die turbulente Schwankungsgeschwindigkeit und die dimensionslosen Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit vermindert, während die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten in den meisten Fällen ansteigen. Andererseits führt die Luftzuführung bei der Zelle mit $H/D_1 = 2,8$ zu einer Zunahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit im oberen Bereich der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone. Aus einem Vergleich der Turbulenzmessungen im Dreiphasensystem geht jedoch hervor, daß die mittleren Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit und die dimensionslosen Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit im Oberteil der Trübezone (Meßorte: A2o, B3o, B2o, C1o) bei der Zelle mit $H/D_1 = 2,8$ kleiner sind als bei der Zelle mit $H/D_1 = 1,0$.

Auf der Basis dieser Ergebnisse kann eine Verbesserung der Flotationsergebnisse und Reduzierung der Trübemitführung bei konstantem begasten Volumen sowie konstanter Luftströmungszahl c_L durch die Erhöhung des H/D_1 -Verhältnisses von 1,0 auf 2,8 erreicht werden. Dies konnte durch die Verminderung der Turbulenzintensität (mittlere Effektivwerte der Schwankungsbewegung) insbesondere im Bereich der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone nachgewiesen werden. Außerdem wurde die positive Wirkung der Rosteinbauten durch die Verzögerung der senkrechten Komponente der mittleren Strömungsgeschwindigkeit (vor allem in der Nähe der Wände) bei beiden Zellen deutlich.

4.5 Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen

In den folgenden Abschnitten werden Ergebnisse der Absetzversuche, der Zeta-Potential-Messungen und des Einflusses der Flockung der feinsten hydrophilen Quarzteilchen einer synthetischen Mischung von Quarz/Fluorit (1:1) auf die Trübemitführung und deren Reduzierung dargestellt und diskutiert. Diese Untersuchungsergebnisse sollen dazu beitragen, den Flockungszustand der Quarzsuspension zu bewerten und seine Wirkung auf die Trübemitführung aufzuklären. Die Quarzflockung könnte dabei zu einer Verminderung der Trübemitführung führen, weil sie die Teilchengröße der feinsten Quarzteilchen erhöht sowie die Teilchenform ändert. Damit kann eventuell der Suspensionszustand der geflockten Quarzteilchen im Vergleich zu den Primärteilchen weniger homogen sein, die Konzentration der geflockten Quarzteilchen in der Trübezone im Bereich direkt unter der Schaumzone im Vergleich zu der der Einzelteilchen vermindert und das Zurückfließen hydrophiler Teilchen in der Schaumzone

infolge Flockenbildung erhöht werden. Jedoch hängen diese positiven Wirkungen der Quarzflockung auf die Reduzierung der Trübe mitführung von der Sedimentationsgeschwindigkeit und dem Bewegungsverhalten der Flocken in der Trübe-Schaum-Grenze und Schaumzone im Vergleich zu der der Einzelteilchen ab. In diesem Zusammenhang spielt die Flockenstruktur (Dicke der inneren Kanäle - Flockenporosität, Flockenporen- und Flockenformverteilung - und der Kanäle zwischen den Flocken) eine entscheidende und bestimmende Rolle (s. Durchströmungsmodell im Abschnitt 3.3.1.1). Nach bisherigen Veröffentlichungen gibt es keine Untersuchungen über die Wirkung der Flockung hydrophiler Teilchen auf die Trübe mitführung und sind die Kenntnisse über das Bewegungsverhalten der Flocken in die/der Schaumzone im Vergleich zu dem der Primärteilchen mangelhaft.

4.5.1 Absetzversuche mit Quarzsuspensionen

Die Tabelle 4.11 stellt den experimentell ermittelten Einfluß der Polymertypen und der Zusatzmenge sowie des Quarzmasseanteils in der Suspension (μ_{SiO_2}) auf die gemessenen stationären Absetzgeschwindigkeiten der Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone von Suspensionen der geflockten Quarzteilchen und die Absetzbedingungen dar.

Die Flockengröße hat sich nach optischen Beobachtungen mit zunehmender Zugabemenge der Polymere bei beiden Quarzmasseanteilen in der Suspension ($\mu_{\text{SiO}_2} = 5$ bzw. 10 %) deutlich vergrößert. Zudem werden mit den kombinierten Polymeren im Vergleich zu den einzelnen kationischen Polymeren (bei gleicher Zugabemenge) größere Flocken erzielt. Es war jedoch nicht möglich, eine Quantifizierung der Flockengröße und -struktur vorzunehmen.

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, daß sich bei $\mu_{\text{SiO}_2} = 5$ % die Absetzgeschwindigkeit mit zunehmender Zugabemenge an Polymeren vergrößert. Außerdem ist die Absetzgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilchen bei Anwendung von Polymerkombinationen (165K+2440, 185K+A3040L, 187K+2440) bei gleichen Zugabemengen größer als die bei Anwendung einzelner kationischer Polymere (185K und 655BC). Das Polymer 187K ist eine Ausnahme, weil die Absetzgeschwindigkeit mit zunehmender Zugabemenge vermindert wird. Bei $\mu_{\text{SiO}_2} = 10$ % ist bei fast allen verwendeten Polymeren – außer 655BC – eine Verminderung der Absetzgeschwindigkeit mit steigender Zugabemenge der Polymere aufgetreten. Die physikalischen Ursachen des unterschiedlichen Bewegungsverhaltens der Quarzflocken bei beiden untersuchten Quarzmasseanteilen in der Suspension lassen sich auf Grundlage des Durchströmungsmodells erklären [84, 206]. Daraus kann man bei steigender Zugabemenge der Polymere ableiten, daß die Erhöhung der Absetzgeschwindigkeit durch die günstigere Quarzflockenstruktur (Erhöhung der Durchlässigkeit der durchströmenden Flockenschicht infolge der Dicke der in-

neren Kanäle der Quarzflocken und der Kanäle zwischen den Quarzflocken) erklärt werden kann, während die Verminderung der Absetzgeschwindigkeit auf eine ungünstige Flockenstruktur (Verringerung der Durchlässigkeit der durchströmenden Flockenschicht infolge der abnehmenden Dicke der inneren Kanäle der Quarzflocken und der Kanäle zwischen den Quarzflocken), eine Erhöhung der Wechselwirkung zwischen den Flocken vor allem bei höherem Quarzmasseanteil in der Suspension (10 %), eine Verstärkung der Schwarmbehinderung und/oder eine Flockenbildung aus einem strukturellen Netzwerk bei den kombinierten Polymeren zurückgeführt werden kann.

Tabelle 4.11: Einfluß der Polymertypen und ihrer Zugabemenge auf die Absetzgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilchen bei verschiedenen Quarzmasseanteilen in der Suspension

Quarzmasseanteil μ_{SiO_2} (%)		5		10
Versuchsbedingungen		1	2	1
Polymertypen	Zugabemenge (mg/l)	Absetzgeschwindigkeit v_s (mm/s)	Absetzgeschwindigkeit v_s (mm/s)	Absetzgeschwindigkeit v_s (mm/s)
185K	5,75		1,89	
	11,5		1,97	0,72
	23,0		2,12	0,73
187K	5,75	1,93		0,89
	11,5	1,78		0,63
	23,0			0,54
	46,0	*		
655BC	5,75		2,87	1,60
	11,5		3,09	0,94
	23,0		3,63	1,10
	46,0		3,87	
185K + 2440	5,75			3,5
	11,5			1,60
	23,0			1,13
	46,0	4,75		
185K + A3040L	5,75			3,75
	11,5	3,95		1,55
	23,0			1,17
187K + 2440	5,75	3,42		2,37
	11,5	4,15		1,37
	23,0			1,07
	46,0	4,42		
187K + A3040L	5,75			2,12
	11,5			1,23
	23,0			1,19

1 Dosierung nach 3 unterschiedlichen Zeiten bei getrennter Zugabe der Lösung von kationischen und anionischen Polymeren und einem Mischungsverhältnis von 10:1

2 Einmalige Dosierung der Zugabemenge der Lösung

* Die Absetzgeschwindigkeit konnte nicht gemessen werden, weil keine Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone erkennbar war.

In Tabelle 4.12 sind die Untersuchungsergebnisse zum Einfluß der Verweildauer der geflockten Quarzsuspension im mechanischen Flotationsapparat unter turbulenten Schubspannungen auf die Absetzgeschwindigkeit der Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone

und auf den „Faktor der Flockenstabilität“ dargestellt. Diese Untersuchungen wurden unter den im Abschnitt 3.3.1.1 aufgeführten Absetzbedingungen durchgeführt. Als „Faktor der Flockenstabilität“ F_{Si} bezeichnet man das Verhältnis von Sinkgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilen nach einer Verweildauer t_{FAi} der Suspension der Quarzflocken im mechanischen Flotationsapparat zur Absetzgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilen direkt nach der Quarzflockung in einem Becherglas ohne Beanspruchung in der Flotationszelle (Verweildauer $t_{FA0} = 0$). Nach dieser Definition ergibt sich für den Faktor der Flockenstabilität

$$F_{Si} = v_s(t_{FAi}) / v_s(t_{FA0}) \quad (21)$$

Die Verminderung des Faktors charakterisiert die Verschlechterung der Stabilität der Flocken in der Suspension nach der turbulenten Beanspruchung. Ein Wert null bedeutet, daß die Flocken nicht mehr existenzfähig sind und eine stabile Suspension gebildet wird. $F_{Si} = 1$ bedeutet, daß die maximale Stabilität der Flocken unter den gegebenen Bedingungen erreicht wird. Diese Untersuchungen zur Flockenstabilität sind unter gleichem Reagensregime und gleichen Flotationsbedingungen, aber ohne Luftzufuhr durchgeführt worden.

Tabelle 4.12: Einfluß der Verweildauer der Quarzsuspension im mechanischen Flotationsapparat unter turbulenten Schubspannungen und der Dosierung von unterschiedlichen Polymertypen auf die Absetzgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilen

Polymertypen	Zugabemenge (mg/l)	Absetzgeschwindigkeit v_s (mm/s)		Faktor der Flockenstabilität F_{Si} bei $t_{FAi} = 20$ min
		$t_{FA0} = 0$ min	$t_{FAi} = 20$ min	
185K	23,0	0,73	0,50	0,68
187K	11,5	0,63	0,40	0,63
	23,0	0,54	0,37	0,68
655BC	11,5	0,94	0,83	0,88
	23,0	1,10	0,80	0,72
	46,0		0,73	
185K + 2440	11,5	1,60	0,90	0,56
	23,0	1,13	0,60	0,53
185K + A3040L	11,5	1,55	0,80	0,52
	23,0	1,17	0,57	0,49
187K + 2440	11,5	1,37	0,67	0,49
	23,0	7,00	0,50	0,47
187K + A3040L	11,5	1,23	0,73	0,59
	23,0	1,47	0,50	0,34

$\mu_{SiO_2} = 10$ %; Mischungsverhältnis: 10:1; Dosierung nach 3 unterschiedlichen Zeiten und bei getrennter Zugabe der Lösungen von kationischen und anionischen Polymeren

Aus den Meßergebnissen in Tabelle 4.12 geht hervor, daß die Absetzgeschwindigkeit unter den im mechanischen Flotationsapparat vorherrschenden turbulenten Bedingungen bei allen verwendeten Polymerzugabemengen reduziert wird. Damit wird mit hoher Wahrscheinlichkeit die stabile Flockengröße für alle Polymertypen bei den verwendeten Flotationsbedingun-

gen vermindert. Bei fast allen Polymertypen, außer bei 187K, nehmen der Faktor der Flockenstabilität und die Absetzgeschwindigkeit bei einer Verweildauer von $t_{FAi} = 20$ min mit steigender Zugabemenge der Polymere ab. Diese Verminderung ist bei Anwendung der kombinierten Polymere größer als bei den einzelnen Polymeren (185K, 187K und 655BC) und ist bei dem Polymer 655BC am geringsten. Danach sind die mit den Polymeren 185K und 187K gebildeten Flocken infolge des etwas kleineren Faktors der Flockenstabilität weniger stabil. Die bessere Stabilität der gebildeten Flocken mit dem Polymer 655BC kann in Übereinstimmung mit der Literatur durch seine große Molekularmasse im Vergleich zu den anderen verwendeten Polymeren (siehe Tabelle 3.3) erklärt werden. Deshalb kann das Polymer 655BC unter den in mechanischen Flotationsapparaten vorherrschenden turbulenten Bedingungen größere stabile Flocken als die anderen Polymere bilden.

Tabelle 4.13: Einfluß der Art und Weise der Polymerdosierung von unterschiedlichen Polymertypen auf die Absetzgeschwindigkeit der geflockten Quarzteilchen

Polymertypen	Art und Weise der Dosierung	Absetzgeschwindigkeit v_s (mm/s)
185K	1x getrennt	0,65
	3x getrennt	0,72
187K	1x getrennt	0,55
	3x getrennt	0,89
655BC	1x getrennt	0,99
	3x getrennt	0,94
185K + 2440	1x getrennt	0,73
	1x gemischt	0,77
	3x getrennt	1,60
185K + A3040L	1x getrennt	1,22
	3x getrennt	1,55
187K + 2440	1x getrennt	1,37
	3x getrennt	1,03
187K + A3040L	1x getrennt	1,23
	3x getrennt	0,92

$\mu_{SiO_2} = 10$ %; Zugabemenge der Polymere: 11,5 mg/l; und Mischungsverhältnis: 10:1

Tabelle 4.13 zeigt den Einfluß der Art und Weise der Dosierung von unterschiedlichen Polymeren auf die Absetzgeschwindigkeit der Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone der Quarzsuspension und die angewendeten Absetzbedingungen. Aus diesen Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, daß die Absetzgeschwindigkeit in den meisten Fällen bei dreistufiger Zugabe des Polymers größer als bei einmaliger bzw. gemischter Zugabe der Polymere ist. Deshalb ist die dreistufige getrennte Zugabe der Polymere für die weiteren Untersuchungen gewählt worden.

Die Ergebnisse der Absetzversuche führen zu den ausgewählten Versuchsbedingungen für die Quarzflockung, die in Tabelle 3.13 wiedergegeben sind und bei den Flotationsversuchen mit geflockten Quarzteilchen benutzt wurden.

4.5.2 Zeta-Potential-Messungen

Im Bild 4.40 ist der Einfluß der Polymerzugabemenge der unterschiedlichen Polymertypen auf das Zeta-Potential des Quarzes bei gleichem Reagensregime und Quarzmasseanteil wie bei den Flotationsversuchen dargestellt. Es ist offensichtlich, daß die Oberfläche der Quarzteilchen bei pH 9,0 und bei Anwesenheit von Wasserglas negativ geladen ist. Die Quarzteilchen weisen ein Zeta-Potential von -29 mV ($\pm 1 \text{ mV}$) auf. Bei Zugabe der unterschiedlichen Polymertypen vermindern sich die negativen Zeta-Potentiale der Quarzteilchen, bleiben aber im untersuchten Konzentrationsbereich noch negativ. Aus diesen Ergebnissen kann man ableiten, daß der Mechanismus der Adsorption der unterschiedlichen Polymertypen auf der Quarzoberfläche vorwiegend durch elektrostatische Adsorption realisiert wird. Damit wird die Polymeradsorption an der Oberfläche der Quarzteilchen durch die Wechselwirkung zwischen den kationischen Gruppen der Polymere und der negativ geladenen Quarzoberfläche bestimmt. Die Polymere, die am stärksten das negative Zeta-Potential des Quarzes reduzieren, sind die Einzelpolymere 185K und 187K. Am wenigsten reduziert das Polymer 655BC das negative Zeta-Potential des Quarzes. Wie die Ergebnisse bei der Untersuchung der Feststoffkonzentrationsprofile im Abschnitt 4.4.1 gezeigt haben, stellt der Zeta-Potentialwert des Quarzes ohne Polymerzusatz eine günstige Bedingung für eine homogene Suspension der Quarzteilchen dar.

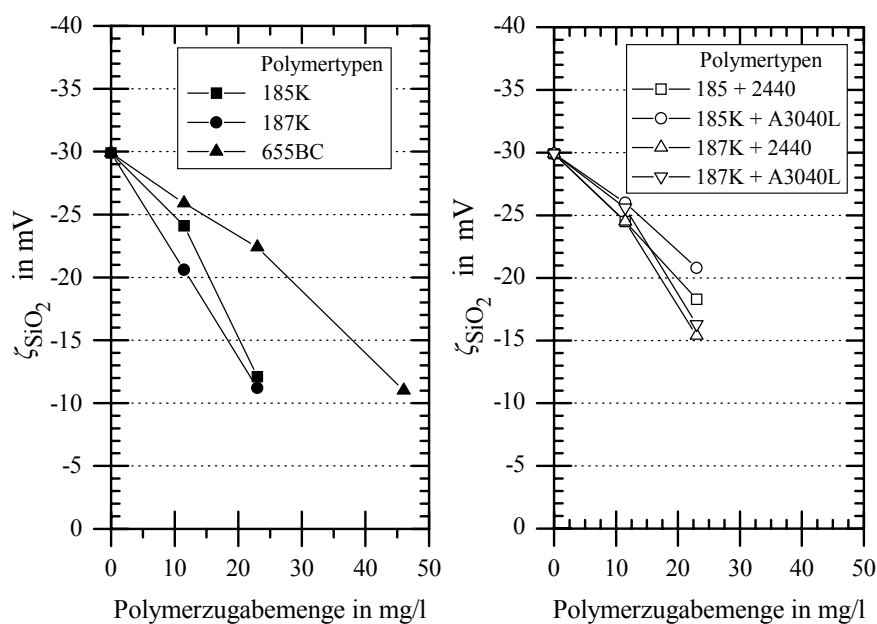


Bild 4.40: Zeta-Potential-Messungen an Quarz $< 50 \mu\text{m}$ als Funktion der Zugabemengen der Polymere bei einem pH-Wert von 9,0

In Tabelle 4.14 ist das Zeta-Potential des Fluorits bei dem in den Flotationsversuchen verwendeten Reagensregime und bei Anwesenheit des Zentrifugats (Klarflüssigkeit) Quarzsuspension mit Wasserglas und dem Polymer 655BC bei einer Zugabemenge von 46,0 mg/l dargestellt. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, daß die Fluoritteilchen bei pH 9,0 sowie bei Anwesenheit von Wasserglas und Natrium-Oleat negativ geladen sind. Das Zeta-Potential beträgt bei pH 9,0 in Anwesenheit von Wasserglas $-43,1$ mV. Bei Zugabe von Natrium-Oleat sinkt das Potential auf $-59,2$ mV. Außerdem wird bei Zugabe der Fluoritteilchen in das Zentrifugat der Quarzflockung mit Polymer 655BC (46,0 mg/l) die Fluoritteilchenoberfläche noch stärker negativ geladen. Offensichtlich wird Wasserglas im Zentrifugat zusätzlich auf der Fluoritoberfläche adsorbiert, während das Polymer 655BC keine entscheidende Wirkung auf das Zeta-Potential des Fluorits hat.

Tabelle 4.14: Zeta-Potential-Messungen des Fluorits bei einem pH-Wert von 9,0 (Reagensregime wie bei den Flotationsversuchen) und unter Anwesenheit des Zentrifugats der Quarzsuspension mit Wasserglas und Polymer 655BC (46 mg/l)

Reagenzien in der Fluoritsuspension*	Zeta-Potential des Fluorits ζ_{CaF_2} (mV)
NaCl (10^{-3} mol/l) (pH = 6,7)	13,9
NaCl (10^{-3} mol/l) und Na_2CO_3	-9,4
NaCl, Na_2CO_3 und Na_2SiO_3	-43,1
NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 und Natrium-Oleat	-59,2
NaCl, Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 , Natrium-Oleat und Zentrifugat der Quarzsuspension mit Wasserglas und Polymer 655BC (46,0 mg/l)	-68,5

* $\mu_{\text{CaF}_2} = 40$ %; Fluoritprobe und Reagensregime wie bei den Flotationsversuchen

Aus den Zeta-Potential-Messungen des Quarzes und Fluorits geht hervor, daß in der Trübezone oder Schaumzone keine Aggregate zwischen diesen beiden Mineralen gebildet werden, da diese Minerale unter den verwendeten Flotationsbedingungen negativ geladen sind ($\zeta_{\text{SiO}_2} = -29$ mV und $\zeta_{\text{CaF}_2} = -43$ mV). Damit ist die Bildung von Schlammüberzügen der feinsten Quarzteilchen auf den Fluoritteilchen als Ausbringensmechanismus des Quarzes in das Schaumprodukt infolge elektrostatischer Anziehungskräfte auszuschließen. Dies korreliert gut mit den Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen. Bei der Anwendung der Polymere bleibt das Zeta-Potential des Quarzes trotz einer Verminderung noch negativ. Unter diesen Bedingungen ist eine Aggregatbildung zwischen Fluoritteilchen und geflockten Quarzteilchen ebenfalls ungünstig.

4.5.3 Flotation mit geflocktem Quarz

Die Anwendung verschiedener einzelner kationischer Polymere (185K, 187K und 655BC) und kombinierter kationischer und anionischer Polymere (185K + 2440, 185K + A3040L, 187K + 2440 und 187K + A3040L) bei Zugabemengen von 11,5 mg/l, 23,0 mg/l und 46,0

mg/l führt zur Beeinflussung des Flockungszustandes der Quarzteilchen und damit der Flotationsergebnisse (s. Bilder 4.41 bis 4.46). Die verwendeten Versuchsbedingungen für die Flotation mit geflockten Quarzteilchen sind in Tabelle 3.13 dargestellt.

Die besten Flotationsergebnisse liefert das Polymer 185K bei einer Zugabemenge von 11,5 mg/l. Es kommt sowohl zu einer Reduzierung der Trübe mitführung (R_{SiO_2} , e_{SiO_2} , c_{SiO_2} und Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$) im Vergleich zu den Versuchen mit den anderen Polymeren als auch zu einer Erhöhung des Fluoritausbringens im Vergleich zum Versuch ohne Polymerzusatz. Das Polymer 655BC führt bei einer Zugabemenge von 23,0 mg/l ebenfalls zu einer Verminderung der Trübe mitführung (etwa gleiches R_{SiO_2} , kleinerer e_{SiO_2} , c_{SiO_2} und kleineres Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$) und zu einer Erhöhung des Fluoritausbringens im Vergleich zum Versuch ohne Polymerzusatz. Bei den anderen Zugabemengen dieses Polymers (11,5 mg/l und 46,0 mg/l) sind das Fluoritausbringen erhöht und die Trübe mitführung nahezu gleich denen ohne Polymerzusatz. Bei Anwendung der kombinierten kationischen und anionischen Polymere verschlechtern sich trotz der Erhöhung des Fluoritausbringens die Flotationsergebnisse, weil sich die Trübe mitführung (R_{SiO_2} , e_{SiO_2} , c_{SiO_2} und Verhältnis $R_{\text{SiO}_2}/R_{\text{CaF}_2}$) stark erhöht. Diese Verschlechterung verstärkt sich mit zunehmender Zugabemenge der kombinierten Polymere.

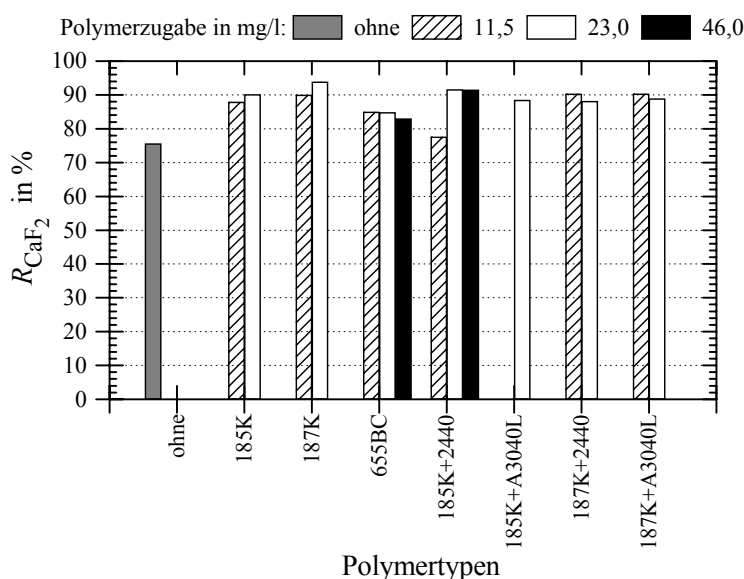


Bild 4.41: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf das Fluoritausbringen ($H_{\text{sch}} = 1,0 \text{ cm}$; $t = 8 \text{ min}$; Quarz (Q2) $< 50 \text{ }\mu\text{m}$)

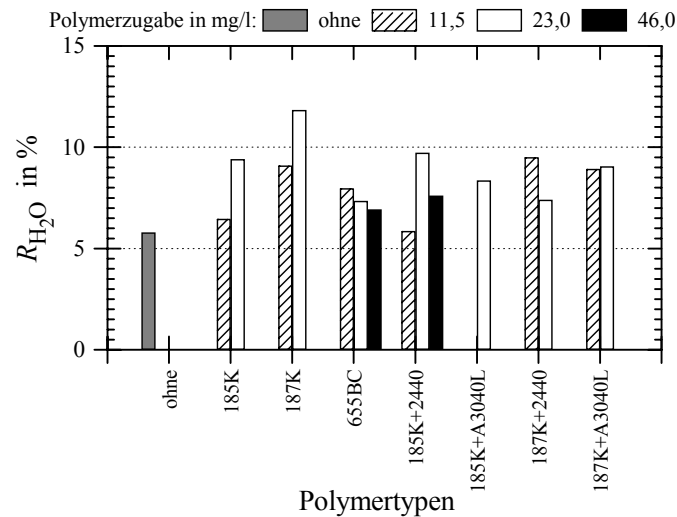


Bild 4.42: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf das Wasserausbringen ($H_{sch} = 1,0$ cm ; $t = 8$ min; Quarz (Q2) < 50 μ m)

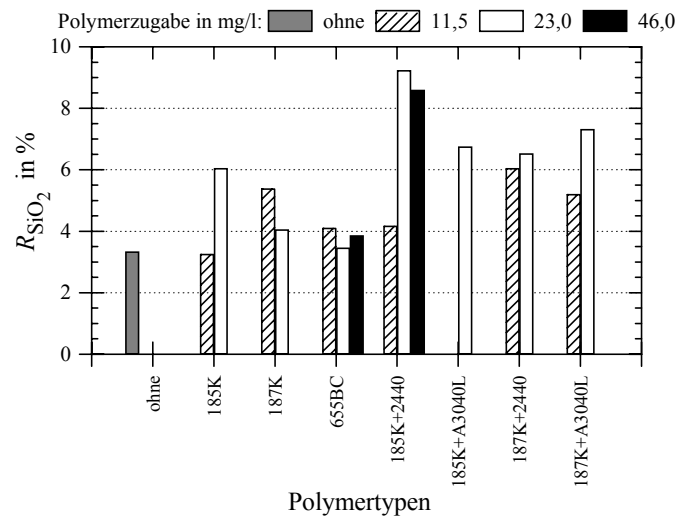


Bild 4.43: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf das Quarzausbringen ($H_{sch} = 1,0$ cm ; $t = 8$ min; Quarz (Q2) < 50 μ m)

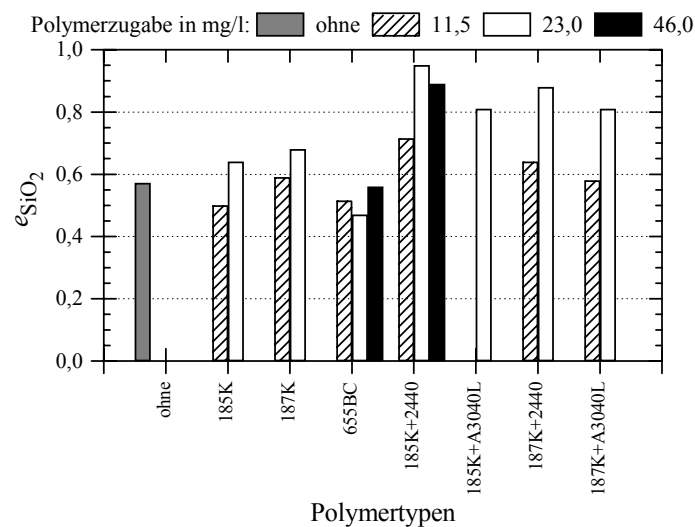


Bild 4.44: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf den Trübungsfaktor ($H_{sch} = 1,0$ cm ; $t = 8$ min; Quarz (Q2) < 50 μ m)

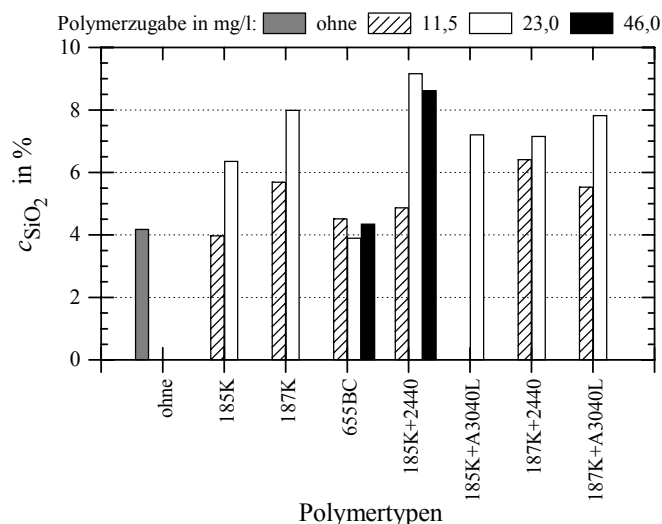


Bild 4.45: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf den Quarzgehalt im Schaumprodukt ($H_{\text{sch}} = 1,0$ cm; $t = 8$ min; Quarz (Q2) < 50 μm)

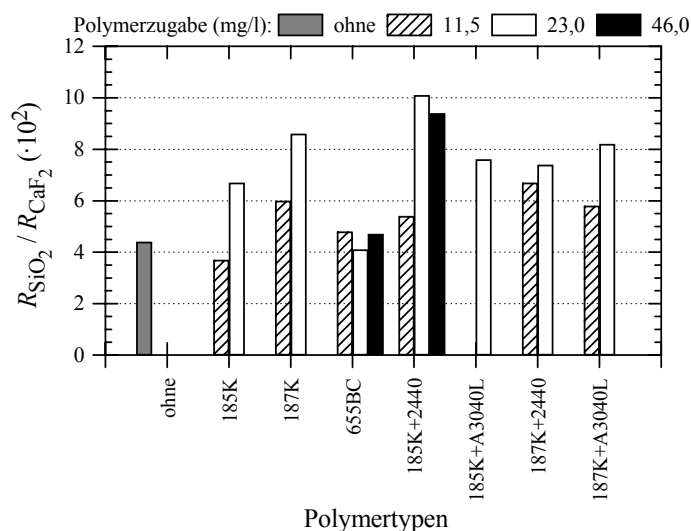


Bild 4.46: Einfluß der Quarzflockung bei Zugabe unterschiedlicher Typen und Mengen von Polymeren auf das Verhältnis $R_{\text{SiO}_2} / R_{\text{CaF}_2}$ ($H_{\text{sch}} = 1,0$ cm; $t = 8$ min; Quarz (Q2) < 50 μm)

Die Änderung des Quarzausbringens, des Wasserausbringens, des Trübeimführungsfaktors, des Quarzgehalts im Schaumprodukt und des Verhältnisses $R_{\text{SiO}_2} / R_{\text{CaF}_2}$ bei Anwesenheit der Polymere ist eine Folge der Struktur und Stabilität der Quarzflocken und ihres Einflusses auf die Schaumentwässerung und das Zurückfließen hydrophiler Teilchen aus der Schaumzone. Bekanntlich hängen Struktur, Größe und Form der Flocken von der Art des Polymers sowie von seiner Zugabemenge ab. Im Abschnitt 4.5.1 ist diese Abhängigkeit für die verschiedenen verwendeten Polymere und Zugabemengen bereits aufgezeigt worden. Die Flockenstabilität in mechanischen Flotationsapparaten vermindert sich bei allen verwendeten Polymeren unter den Versuchsbedingungen mit steigender Zugabemenge der Polymere (s. Tabelle 4.12). Am stärksten ist dieser Abfall bei den kombinierten Polymeren. Dagegen sind bei niedriger Zugabemenge

der Polymere 185K (11,5 mg/l) wegen der relativ stabilen, weniger porösen (kompakt) und kleinen Quarzflocken und bei allen Zugabemengen von 655BC wegen der relativ stabilen, porösen und kleinen Quarzflocken der Rückfluß des Wassers und der hydrophilen Teilchen wenig behindert. Bei niedriger Zugabemenge des Polymers 187K (11,5 mg/l) und mittleren Zugabemengen der kationischen Polymere 185K und 187K (23,0 mg/l) sind die Quarzflocken dagegen größer, weniger stabil und besitzen eine Netzwerkstruktur. Damit verschlechtert sich das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen infolge der Verstopfung der Schaumlamellen durch derartige Flocken. Bei kleineren und mittleren Zugabemengen der kombinierten kationischen und anionischen Polymere (185K+2440, 185K+A30402, 187K+2840 und 187K+A30402) und bei höheren Zugabemengen der Polymere 185K+2440 sind die Quarzflocken noch größer, relativ poröser und am wenigsten stabil und sie können durch das strukturelle Netzwerk der Polymere gebildet werden. Daraus folgt eine noch weitere Verschlechterung des Zurückfließens des Wassers und der hydrophilen Teilchen.

Das Fluoritausbringen ist bei Anwesenheit der Polymere vorwiegend höher als ohne Polymerzusatz. Dies wird in Übereinstimmung mit der Literatur mit einer Turbulenzdämpfung infolge der Erhöhung des Flockungszustandes der feinsten Quarzteilchen erklärt [1,14]. Dieser Turbulenzdämpfungseffekt wirkt sich positiv auf die Flotation der größeren Teilchen (Fluoritprobe) aus. Dadurch entstehen größere Blasen und die turbulente Beanspruchung beladener Blasen wird reduziert. Hierdurch wird insbesondere die Grobteilchenflotation beschleunigt. Außerdem wird das Fluoritausbringen im Schaum auch durch die Verminderung des Zurückfließens des Wassers und der Teilchen aufgrund der Quarzflocken begünstigt.

Aus den Ergebnissen der Absetzversuchen ist zu erkennen, daß sich die Sinkgeschwindigkeit mit abnehmendem Quarzmasseanteil in der Suspension stark erhöht (s. Tabelle 4.11). Die Sedimentation der Quarzflocken sollte ferner durch eine günstigere Flockenstruktur (Erhöhung der Flockenporosität und der Dicke der Kanäle zwischen den Flocken) oder durch Verminderung der Schwarmbehinderung verbessert sein. Um zu wissen, ob die Verbesserung des Sedimentationsverhaltens der Quarzflocken mit abnehmendem Feststoffmasseanteil in der Trübe eine positiv Wirkung auf die Trübemitführung hat, wurde der Einfluß der Quarzflockung mit der Kombination der kationischen und anionischen Polymere 185K+2440 bei einer Zugabemenge von 46,0 mg/l, einem Mischungsverhältnis von 3:1 und bei einem Feststoffmasseanteil in der Trübe von 5 % und 20 % untersucht. Tabelle 4.15 gibt die Ergebnisse dieser Untersuchungen wieder. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, daß die Verminderung des Feststoffmasseanteils in der Trübe bei Anwesenheit der Quarzflocken günstigere Flotationsergebnisse liefert, weil die Trübemitführung (R_{SiO_2} und c_{SiO_2}) mit kombinierten Polymeren bei $\mu_{\text{su}} = 5 \%$

bei gleichem Fluoritausbringen kleiner ist als ohne Polymerzusatz. Jedoch wird das Fluoritausbringen im Vergleich zu den Ergebnissen mit einem höheren Feststoffmasseanteil in der Trübe ($\mu_{\text{su}} = 20 \text{ ‰}$) stark vermindert. Die Verminderung der Trübemitführung mit abnehmendem Feststoffmasseanteil in der Trübe in Anwesenheit der Quarzflocken kann durch die Verbesserung des Zurückfließens des Wassers und der hydrophilen Teilchen infolge der nicht stark feststoffbeladenen Blasen und der Quarzflocken in der Schaumzone erklärt werden.

Tabelle 4.15: Einfluß der Quarzflockung und des Feststoffmasseanteils bei Anwendung der kombinierten Polymere 185K + 2440 (Zugabemenge: 46,0 mg/l) auf die

Feststoffmasseanteil in der Trübe $\mu_{\text{su}} \text{ (‰)}$	5		20	
Polymer 185 K + 2440	ohne	46,0 mg/l	ohne	46,0 mg/l
$R_{\text{CaF}_2} \text{ (‰)}$	57,7	57,8	75,6	75,3
$R_{\text{H}_2\text{O}} \text{ (‰)}$	1,25	1,03	5,79	6,26
$R_{\text{SiO}_2} \text{ (‰)}$	1,09	0,81	3,34	4,17
e_{SiO_2}	0,87	0,79	0,56	0,67
$R_{\text{SiO}_2} / R_{\text{CaF}_2} (\exists 10^2)$	1,9	1,4	4,4	5,5
$c_{\text{SiO}_2} \text{ (‰)}$	1,89	1,45	4,19	5,35

Versuchsbedingungen: $H_{\text{sch}} = 1,0 \text{ cm}$; $t = 8 \text{ min}$; Quarz (Q2) $< 50 \text{ }\mu\text{m}$. Mischungsverhältnis: 3:1

Aus den Ergebnissen zum Einfluß der Quarzflockung kann zusammenfassend geschlußfolgert werden, daß sich die Trübemitführung ohne Verringerung des Wertstoffausbringens durch die Beeinflussung der Eigenschaften der hydrophilen feinen Teilchen mittels der Flockung vermindern läßt. Das wird durch Anwendung von geeigneten Polymeren und Zugabemengen, mit denen nur kleine, stabile Flocken gebildet werden, welche die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen nicht behindern, erreicht.

Um die Ergebnisse zum Einfluß der Quarzflockung auf die Trübemitführung besser zu erklären und ihre positive Wirkung zur Steuerung oder Reduzierung der Trübemitführung nutzen zu können, sind noch weitere Untersuchungen über die Wechselwirkung zwischen den Eigenschaften der Flocken (Form, Größe, Struktur, Stabilität der Flocken unter turbulenten Bedingungen usw.) und den Vorgängen in der Schaumzone (Schaumentwässerung, -stabilität und -struktur) und ihre Wirkung auf die Trübemitführung erforderlich.

5 Schlußfolgerungen

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit haben folgende wesentliche Beiträge zur Aufklärung der Ursachen und Hinweise zur Steuerung sowie zur Reduzierung der Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten erbracht:

- a) Es wurde eine neue experimentelle Methode zur getrennten Ermittlung des Anteils der Trübe mitführung und der Heterokoagulation am Gesamtausbringen entwickelt. Das Prinzip dieser Methode besteht in der Anwendung eines Mineralgemisches, bei dem die hydrophoben Teilchen größer als die hydrophilen sind. Somit kann durch eine Siebklassierung zwischen den beiden Ausbringensmechanismen Heterokoagulation und Trübe mitführung unterschieden werden. Dies führt zu einer erheblichen Vereinfachung der Versuchsdurchführung gegenüber bisherigen Bestimmungsmethoden. Trotz der deutlichen Unterschiede zu einem Aufgabegut mit normaler Teilchengrößenzusammensetzung und der daraus resultierenden starken Veränderung der Flotationsbedingungen können qualitative und übertragbare Aussagen zum Ausbringen durch Heterokoagulation und durch Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten gewonnen werden. Vergleiche der eigenen Ergebnisse mit den meisten Autoren weisen eindeutig nach, daß diese Methode die gleichen Tendenzen der Ergebnisse liefert. Die verwendete synthetische Mischung aus Fluorit (hydrophobierter Feststoff) und Quarz (hydrophiler Feststoff) erwies sich als gut geeignet zur getrennten Bestimmung des Ausbringens durch Heterokoagulation und Trübe mitführung, weil Quarz ausschließlich durch Trübe mitführung und Fluorit nur durch Heterokoagulation ins Schaumprodukt gelangen. Dies konnte durch Untersuchungen zur Flotierbarkeit des Quarzes, rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (keine Bildung von Schlammüberzügen) sowie Zeta-Potential-Messungen nachgewiesen werden.
- b) Die neu eingeführte Bewertungsgröße, das Verhältnis zwischen dem Ausbringen hydrophiler Teilchen durch Trübe mitführung (R_{SiO_2}) und dem Ausbringen hydrophober Teilchen durch Heterokoagulation (R_{CaF_2}), ist zur Beurteilung der Trübe mitführung geeignet. Wesentliche Vorteile der Nutzung dieser dimensionslosen Verhältniszahl gegenüber dem bisher bevorzugten Trübe mitführungsfaktor e_{ij} sind die geringere Empfindlichkeit auf Abweichungen des Wasserausbringens, die bessere Widerspiegelung der Wirkung der hydrophoben Teilchen auf die Schaumeigenschaften, auf die Schaumvorgänge und auf den Trübe volumenstrom in die Schaumzone sowie ins Schaumprodukt sowie die bessere Korrelation dieser Verhältniszahl mit dem Ausbringen hydrophiler Teilchen durch Trübe mitführung und der Qualität des Konzentrats. Diese Verhältniszahl ist besonders bei Laborflotationsversuchen von Bedeutung, wo die Bestimmung des Wasserausbringens auf Grund der Zugabe von Ausgleichswasser fehlerbehaftet ist.

- c) Durch Anwendung der neu entwickelten Methode wird ein wesentlicher Beitrag zur Aufklärung der teilweise widersprüchlichen Aussagen in der Literatur zum Einfluß der Zusammensetzung der Aufgabetrübe, des Luftvolumenstromes und des Feststoffmasseanteils auf die Trübe mitführung hydrophiler Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten geleistet.
- c.1) Im Gegensatz zur bisherigen Auffassung zeigen die Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit, daß die Zusammensetzung der Aufgabetrübe die Trübe mitführung beeinflusst. Allerdings haben andere Autoren nur einen engen Bereich der Zusammensetzung der Aufgabetrübe (Verhältnis der Anteile hydrophober und hydrophiler Feststoffe) untersucht.
- c.2) In der Literatur bestehen unterschiedliche Auffassungen zum Einfluß des Luftvolumenstromes auf die Trübe mitführung. Das ist darauf zurückzuführen, daß Teilvorgänge im Schaum nicht berücksichtigt wurden (Kinetik der Schaumentwässerung und des Zurückfließens der Feststoffteilchen im Schaum, Verengung der Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanäle in Abhängigkeit von Schaumhöhe, scheinbare Viskosität der Trübe in den Schaumlamellen und *Gibbs*-Kanälen, Ausbringen durch Einschließung). Im Allgemeinen führt eine Verminderung des Luftvolumenstroms zur Reduzierung der Trübe mitführung. Bei Unterschreitung eines Grenzwertes wird jedoch der gegenteilige Effekt beobachtet. Dies wird darauf zurückgeführt, daß in diesem Fall die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen beeinträchtigt werden.
- c.3) Die Mehrheit der bisherigen Veröffentlichungen weisen auf die Zunahme der Trübe mitführung mit steigendem Feststoffmasseanteil in der Aufgabetrübe hin. Dies bestätigen die eigenen Versuchsergebnisse. Im Gegensatz dazu beobachten einige Autoren ein Konstantbleiben des Trübe mitführungsfaktors. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, daß dies nur bei mittleren Feststoffmasseanteilen (10 bis 20 %) auftritt. Diese unterschiedlichen Auffassungen sind offensichtlich durch die Verwendung eines eng begrenzten Feststoffmasseanteils sowie die Abwesenheit von hydrophoben Teilchen im Aufgabegut und damit die fehlende Rückwirkung dieser Teilchen auf die Schaumeigenschaften und -vorgänge zurückzuführen.
- d) Die wesentlichen Feststellungen aus den Ergebnissen zum Einfluß wichtiger Prozeßparameter werden in Abschnitten d.1), d.2) und d.3) zusammengefaßt.
- d.1) Die Trübe mitführung wird durch die Vorgänge in der Schaumzone unter folgenden besonderen Bedingungen bestimmt:
- Bei hohem beladenen und stabilem Schaum infolge des hohen Anteils an hydrophoben Teilchen in der Aufgabetrübe werden die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen behindert.

- Bei einer Aufgabetrübe mit sehr niedrigem Gehalt an hydrophoben oder hydrophobierten Teilchen wird ein instabiler, wäßriger und feststoffarmer Schaum gebildet, der Kurzschlüsse der hydrophilen Teilchen und des Wassers von der Trübezone zum Schaumprodukt begünstigt.
 - Bei niedrigem Luftvolumenstrom werden die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen infolge der Verengung der Schaumlamellen und der *Gibbs*-Kanäle behindert.
 - Bei einer Schaumzone mit sehr großer Höhe und stark feststoffbeladenem Schaum wird das Ausbringen durch Einschließung der hydrophilen Teilchen begünstigt und damit das Fließverhalten des Schaumes durch die Erhöhung seiner scheinbaren Viskosität verschlechtert.
- d.2) Unter anderen als den in d.1) dargestellten Versuchsbedingungen wird die Trübemitführung durch den Suspensionszustand und den Trübemassestrom in die Schaumzone bzw. ins Schaumprodukt bestimmt.
- d.3) Das Wasserausbringen und die Trübemitführung werden durch die Veränderung der Aufgabezusammensetzung, die Flotationszeit, die Schaumhöhe, die Trübedichte und den spezifischen Luftdurchsatz stark beeinflusst. Die Steuerung der folgenden Parameter bewirkt unter Bedingungen der wirtschaftlichen Wertstoffgewinnung (Ausbringen und Gehalt des Schaumprodukts und Durchsatz der Flotationsanlage) und bei konstanter Flotationszeit eine Reduzierung des Wasserausbringens und damit der Trübemitführung: eine Verminderung des Luftvolumenstromes sowie des Feststoffmasseanteils in der Trübe und eine Vergrößerung der Schaumhöhe. Außerdem vermindern sich das Wasserausbringen und die Trübemitführung hydrophiler Teilchen bei abnehmendem Masseanteil an hydrophoben Teilchen in der Aufgabe. Daraus resultiert, daß die Variationen der Zusammensetzung des Aufgabegutes bei Flotationsprozessen möglichst gering zu halten sind.
- e) Aus den Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung der Turbulenzintensität auf die Trübemitführung und deren Reduzierung kann man wesentliche neue Ergebnisse zusammenfassen, die in den folgenden Abschnitten dargestellt werden.
- e.1) Wesentliche Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Systems zur Reduzierung der Trübemitführung ohne Abnahme des Wertstoffausbringens sind die Verminderung der Turbulenzintensität im oberen Trübevolumen der Flotationszelle und die Erzeugung einer stabilen Schaumschicht. In diesem Zusammenhang lieferte das System mit radial ausgerichteten und hochgezogenen Statorblättern (System B) die besten Flotationsergebnisse.
- e.2) Die Flotationsergebnisse können durch Anwendung und geeignete Positionierung sowie

optimale Geometrie von Rosteinbauten erheblich verbessert werden. Bei Positionierung der Roste oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems oder in der Trübe-Schaum-Grenze bei der Zelle mit dem Verhältnis $H/D_1 = 1,0$ (H Füllhöhe und D_1 Kantenlänge der Zelle) steigen das Fluoritausbringen und die Konzentratqualität, während das Verhältnis R_{SiO_2}/R_{CaF_2} und die Trübemitführung abnehmen. Bei der Positionierung der Rosteinbauten mit gleichem Abstand zwischen Rost/Rotor und Rotor/Zellenboden verschlechtern sich jedoch die Flotationsergebnisse. Beste Resultate werden in der Position der Roste oberhalb des Rotor-Stator-Strombrecher-Systems erreicht. Prinzipiell erwies sich Rosttyp RB mit kleiner Weite D_R ($D_R/D_1 = 0,033$) und mittlerer Höhe H_R ($H_R/D_1 = 0,20$) der Rostöffnungen als günstigste Konstruktion in Bezug auf die Reduzierung der Trübemitführung (niedrigste Werte des Quarzausbringens und Quarzgehaltes im Schaumprodukt) bei gleichzeitiger Erhöhung des Fluoritausbringens. Eine optimale Geometrie der Rosteinbauten zur Erreichung der Reduzierung der Trübemitführung ohne Abnahme des Wertstoffausbringens sollte die folgenden Bedingungen erfüllen:

- Erzeugung einer ruhigen, stabilen Schaumschicht entweder durch eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse im oberen Bereich der Zelle oder mittels einer Verminderung der durch die turbulenten Strömungsverhältnisse verursachten Schwankungsbewegungen der Trübe-Schaum-Grenze;
- Begünstigung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen durch eine Beruhigung der Strömungsverhältnisse im oberen Bereich der Zelle, um das Wertstoffausbringen konstant zu halten oder zu erhöhen;
- Unterstützung des Zurückfließens hydrophiler Teilchen und der Schaumentwässerung;
- Angemessene Verzögerung oder Verminderung des Trübemassestromes in den Schaum, um einen Kurzschluß des Wassers und der hydrophilen Teilchen von der Trübezone zum Schaumprodukt zu vermeiden.

e.3) Aus den vorliegenden Ergebnissen zum Einfluß der Änderung der Zellengeometrie durch das zunehmende Verhältnis H/D_1 der Zellen kann geschlußfolgert werden:

- i. Die beiden Varianten der Änderungen der Zellengeometrie (konstante Querschnittsfläche und konstantes Trübevolumen) bei konstanter Luftströmungs-Zahl und konstantem spezifischen Leistungseintrag führen zu einer Erhöhung der Trübemitführung, des Wertstoff- und Wasserausbringens im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Standardzelle. Bei diesen beiden Varianten spielen die Luftleerrohrgeschwindigkeit sowie Rotorumfangsgeschwindigkeit und ihre Wirkung auf die mittlere Schaumverweilzeit bzw. Flotationskinetik eine bestimmende Rolle für die Erhöhung der Trübemitführung.

- ii. Das Verhältnis H/D_1 von 2,8 im Vergleich zu den Flotationszellen mit dem herkömmlichen H/D_1 -Verhältnis ($H/D_1 = 1,0$) bei gleichem Volumen der begasten Trübe führt zu einer Verminderung der Trübemithführung und zu einer Erhöhung des Wertstoffausbringens. Um das zu erreichen, sind gleichzeitig folgende Bedingungen zu erfüllen:
- Der Leistungseintrag ist im Vergleich zu Zellen mit einem herkömmlichen H/D_1 -Verhältnis so niedrig wie möglich zu halten. Dies kann z. B. durch die Anwendung der Rotorumfangsgeschwindigkeit nahe dem Bereich des 1s-Kriteriums erreicht werden.
 - Es ist eine niedrigere Luftleerrohrgeschwindigkeit zu erzeugen, um die mittlere Schaumverweilzeit zu vergrößern. Damit werden die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen sowie des Wassers in die Trübe begünstigt.
 - Die Flotationskinetik sollte durch eine Verzögerung des Aufstiegs der feststoffbeladenen Blasen verlangsamt werden (aber ohne Beeinträchtigung der wirtschaftlichen Wertstoffgewinnung), um eine gleichmäßige Verteilung des Ausbringens über die Gesamtflotationszeit zu erreichen. Damit werden eine Beruhigung des Trübevolumens im Bereich direkt unterhalb der Schaumzone und eine stabile Schaumzone erzeugt sowie der mittlere Massestrom von hydrophilen Teilchen, Wasser und Trübe in die Schaumzone und das Schaumprodukt so niedrig wie möglich gehalten. Dies könnte durch die Anwendung von Rosteinbauten erreicht werden.
- e.4) Die synergetische Wirkung der Kombination der Anwendung einer schlanken Zelle ($H/D_1 = 2,8$) mit Rosteinbauten (Positionierung in der Trübe-Schaum-Grenze) führt zu den besten Flotationsergebnissen im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Rosteinbauten bei der Zelle mit $H/D_1 = 2,8$ und zu den mit der Standardzelle mit und ohne Einbauten. Das heißt, es treten die stärkste Verminderung der Trübemithführung, der geringste Quarzgehalt und ein höheres Wertstoffausbringen auf. Dies wird mit einer günstigeren Verzögerung des Aufstieges der feststoffbeladenen Blasen, mit einer stabilen Trübe-Schaum-Grenze, mit einer Verlangsamung und einer gleichmäßigeren Verteilung des Ausbringens über die Gesamtflotationszeit und mit günstigeren Bedingungen für die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen begründet. Die Roste mit mittleren Weiten und Höhen der Rostöffnungen (Rosttyp RI: $D_R/D_1 = 0,116$ und $H_R/D_1 = 0,28$; Rosttyp RJ: $D_R/D_1 = 0,116$ und $H_R/D_1 = 0,46$) können gleichzeitig diese Bedingungen erfüllen.
- e.5) Die durchgeführten Turbulenzmessungen bestätigten die in dieser Arbeit geäußerte Hypothese zur Reduzierung der Turbulenzintensität im oberen Bereich der Trübezone durch eine Erhöhung des Verhältnisses H/D_1 von 1,0 auf 2,8.

- f) Die Beeinflussung der Eigenschaften der hydrophilen Teilchen durch die Flockung führt zu einer Verbesserung der Flotationsergebnisse, d. h. zu einer Verringerung der Trübe mitführung und zu einer Erhöhung des Wertstoffausbringens. Das wird durch die Anwendung geeigneter Polymere und Zugabemengen, mit denen nur kleine stabile Flocken gebildet werden, welche die Schaumentwässerung und das Zurückfließen hydrophiler Teilchen nicht behindern, erreicht.
- g) Um die neuen Möglichkeiten zur Reduzierung der Trübe mitführung (Anwendung der Rosteinbauten, Änderung der Zellengeometrie, synergetische Wirkung der Kombination der Änderung der Zellengeometrie mit Rosteinbauten und Flockung hydrophiler Teilchen) wirtschaftlich nutzen zu können, muß noch die klein- bzw. großtechnische Übertragbarkeit der Ergebnisse überprüft werden.

Aus den Ergebnissen leitet sich eine Reihe neuer Fragestellungen ab, die in fortführenden Untersuchungen geklärt werden sollten:

- a) Wie wirken andere herkömmliche turbulenz erzeugende Systeme (Outokumpu, Wemco, Agitair) auf die Trübe mitführung und ihre Reduzierung?
- b) Welchen Einfluß haben die Wechselwirkungen zwischen Suspensionszustand, Belüftung und den Vorgängen in der Schaumzone auf die Trübe mitführung?
- c) Wie wirken sich die hydrodynamischen Bedingungen im Mehrphasensystem (Feststoff-Flüssigkeit-Luft) auf die Flotationsmikroprozesse (Suspendieren und Dispergieren der Teilchen, Luftdispergieren) und damit auf die Trübe mitführung aus? Dazu ist eine Weiterentwicklung der Turbulenzmeßtechnik für Mehrphasenströmungen erforderlich, um die Turbulenzparameter in der Trübe messen zu können und somit die Erkenntnisse über die Mikroprozesse zu vertiefen und damit ihre Wirkung auf die Trübe mitführung weiter aufzuklären.
- d) In weiteren Untersuchungen ist der Einfluß der Eigenschaften der Flocken von hydrophilen Teilchen auf die Trübe mitführung weiter aufzuklären, um unter hochturbulenten Strömungsbedingungen ihre positive Wirkung zur Steuerung oder zur Reduzierung der Trübe mitführung nutzen zu können. Dazu sind weitere Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften der Flocken (Form, Größe, Struktur, Stabilität usw.) und den Vorgängen in der Schaumzone (Schaumentwässerung, -stabilität und -struktur) erforderlich.
- e) Weitere Turbulenzmessungen in den anderen verwendeten Zellentypen sind notwendig, um die Flotationsergebnisse unter dem Einfluß der Änderung der Zellengeometrie besser zu erklären.
- f) Es sollte eine weitere Optimierung der Geometrie der Roste erfolgen.
- g) Läßt sich durch eine verbesserte Art und Weise des Schaumabzuges sowie durch Änderung der Schaumkammergeometrie eine weitere Reduzierung der Trübe mitführung erreichen?

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mit Hilfe einer neu entwickelten Methode zur getrennten Bestimmung des Feststoffausbringens durch Trübemitführung und Heterokoagulation die Wirkung einiger wichtiger Prozeßparameter zu bewerten. Darüber hinaus ist der Einfluß der Modifizierung des Suspensionszustandes (Änderung der Turbulenzintensität) bzw. des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen auf die Trübemitführung feiner hydrophiler Teilchen in mechanischen Flotationsapparaten aufzuklären. Es war zu prüfen, inwieweit durch die Variation wichtiger Prozeßparameter und unter welchen Bedingungen der Beeinflussung des Suspensionszustandes und Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen eine Steuerung und Reduzierung der Trübemitführung erreicht werden kann. Das Prinzip der neu entwickelten Methode besteht in der Anwendung eines Mineralgemisches, bei dem die hydrophoben Teilchen größer als die hydrophilen sind. Somit kann eine Trennung nach den beiden Ausbringensmechanismen Heterokoagulation und Trübemitführung durch eine Siebklassierung erfolgt.

Die Untersuchungen sind in mechanischen Laborflotationszellen (3,4-l-Standardzelle) mit synthetischen Mischungen aus Quarz- (hydrophil) und Fluoritprobe (hydrophob), die unterschiedliche Teilchengrößenverteilungen hatten, als Versuchsgut durchgeführt worden. Die Zusammensetzung der Aufgabetrübe, der spezifische Luftvolumenstrom, die Schaumhöhe und der Feststoffmasseanteil in der begasten Trübe wurden variiert. Die Beeinflussung des Suspensionszustandes wurde durch die Anwendung verschiedener Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme, die Verwendung von Rosteinbauten und durch die Änderung der Zellengeometrie in Zusammenhang mit der Variation des Leistungseintrags und in Kombination mit Rosteinbauten untersucht. Diese Maßnahmen zur Variation des Suspensionszustandes zielten auf die Reduzierung der Turbulenzintensität im oberen Bereich der Trübezone, direkt unterhalb der Schaumzone ab. Für die Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung des Flockungszustandes hydrophiler Teilchen (Quarz) kamen kationische Polymere und Kombinationen kationischer und anionischer Polymere zur Anwendung. Durch die Untersuchungen zur Messung der Feststoffkonzentration in Abhängigkeit von der Zellenhöhe, zu Turbulenzmessungen mit einem Ultraschall-Doppler-Meßgerät in Ein- und Mehrphasenströmungen in der eingesetzten Flotationszelle, zu Absetzversuchen mit den Quarzsuspensionen und zu Zeta-Potential-Messungen des Quarzes und Fluorits wurden zusätzliche und wichtige Informationen zur Erklärung der Ergebnisse gewonnen.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit haben folgende wesentliche neue Beiträge zur Aufklärung der Ursachen sowie Hinweise zur Steuerung und zur Reduzierung der Trübemitführung in mechanischen Flotationsapparaten erbracht:

- a) Die neu entwickelte experimentelle Methode zur getrennten Ermittlung des Anteils der Trübe mitführung und der Heterokoagulation am Gesamtausbringen führt zu einer erheblichen Vereinfachung der Versuchsdurchführung gegenüber bisherigen Bestimmungsmethoden. Durch diese neue Methode können qualitative und übertragbare Aussagen zum Ausbringen durch Trübe mitführung und durch Heterokoagulation in mechanischen Flotationsapparaten gewonnen werden.
- b) Es wurde eine neue Bewertungsgröße, das Verhältnis zwischen dem Ausbringen hydrophiler Teilchen durch Trübe mitführung und dem Ausbringen hydrophober Teilchen durch Heterokoagulation, zur Beurteilung der Trübe mitführung eingeführt. Diese dimensionslose Verhältniszahl ist besser geeignet als der bisher genutzte Trübe mitführungsfaktor e_{ij} .
- c) Auf Grund der Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß wichtiger Prozeßparameter wurde festgestellt, daß die Trübe mitführung durch die Vorgänge in der Schaumzone oder durch den Suspensionszustand sowie den Trübe massestrom in die Schaumzone bzw. ins Schaumprodukt bestimmt wird. Die wichtigsten Flotationsbedingungen, die für die einzelnen Mechanismen eine bestimmende Rolle für die Trübe mitführung spielen, wurden aufgezeigt. Außerdem veranschaulichen diese Ergebnisse, daß die Steuerung der folgenden Parameter unter Bedingungen der wirtschaftlichen Wertstoffgewinnung (Ausbringen und Gehalt des Schaumprodukts und Durchsatz der Flotationsanlage) und bei konstanter Flotationszeit eine Reduzierung des Wasserausbringens und damit der Trübe mitführung bewirkt: eine Verminderung des Luftvolumenstromes sowie des Feststoffmasseanteils in der Trübe und eine Vergrößerung der Schaumhöhe. Weiterhin vermindern sich das Wasserausbringen und die Trübe mitführung hydrophiler Teilchen bei abnehmendem Masseanteil an hydrophoben Teilchen in der Aufgabetrübe.
- d) Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der Modifizierung der Turbulenzintensität im oberen Bereich der Trübe zone und zum Einfluß der Flockung der hydrophilen Teilchen haben nachgewiesen, daß eine Reduzierung der Trübe mitführung mit Verbesserung der Konzentratqualität und eine Erhöhung des Wertstoffausbringens durch die folgenden Maßnahmen erreichbar sind: durch die Auswahl eines geeigneten Rotor-Stator-Strombrecher-Systems, durch Anwendung von Rosteinbauten in günstiger Positionierung und mit optimaler Geometrie, durch eine Erhöhung des Verhältnisses H/D_1 (H Füllhöhe und D_1 Kantenlänge der Zelle) bei konstantem Volumen, konstanter Luftströmungs-Zahl und abnehmendem spezifischen Leistungseintrag im Vergleich zu den Flotationszellen mit herkömmlichem H/D_1 -Verhältnis ($H/D_1 = 1,0$), durch die synergetische Wirkung der Kombination der Änderung der Zellengeometrie mit Einsatz von Rosteinbauten und durch die Bildung von Flocken

hydrophiler Teilchen mit geeigneter Form, Struktur und Stabilität. Die Bedingungen und Kriterien zur Erreichung akzeptabler Flotationsergebnisse und zur Reduzierung der Trübe mitführung bei jeder der vorgenannten Möglichkeiten sind aufgezeigt und deutlich beschrieben. Bei Auswahl eines geeigneten Rotor-Stator-Strombrecher-Systems ist die Fähigkeit dieses Systems zur Erzeugung einer Beruhigung der Trübeströmung im oberen Trübevolumen der Flotationszelle und einer stabilen Schaumschicht entscheidend. Ein System mit radial ausgerichteten und hochgezogenen Statorblättern liefert die besseren Flotationsergebnisse. Bei der Anwendung von Rosteinbauten spielen die Positionierung und die Geometrie der Roste (D_R Weite und H_R Höhe der Rostöffnungen) eine entscheidende Rolle. Bessere Resultate wurden in der Position oberhalb Rotor-Stator-Strombrecher-System und mit einem Rosttyp mit kleinen Öffnungen ($D_R/D_1 = 0,033$) und mittlerer Höhe ($H_R/D_1 = 0,20$) bei einer Zelle mit einem Verhältnis $H/D_1 = 1,0$ erreicht. Die Bedingungen, die ein Rost mit optimaler Geometrie erfüllen muß, wurden beschrieben. Im Zusammenhang mit der Änderung der Zellengeometrie wurden gute Flotationsergebnisse bei der Zelle mit dem Verhältnis $H/D_1 = 2,8$ und unter einem niedrigen spezifischen Leistungseintrag (1s-Kriterium), geringer Luftleerrohrgeschwindigkeit und angemessene Verlangsamung der Flotationskinetik erreicht. Die besten Flotationsergebnisse liefert die Kombination von Änderung der Zellengeometrie (Zelle mit dem Verhältnis $H/D_1 = 2,8$) mit Anwendungen von Rosteinbauten ($D_R/D_1 = 0,116$ und $H_R/D_1 = 0,46$) bei einer Position in der Trübe-Schaum-Grenze. Dies wird mit der Verzögerung des Aufstiegs der feststoffbeladenen Blasen, mit einer Verlangsamung und einer gleichmäßigeren Verteilung des Ausbringens über die Gesamtflotationszeit und mit günstigeren Bedingungen für die Schaumentwässerung und das Zurückfließen der hydrophilen Teilchen sowie für die Erzeugung einer ruhigen Trübe-Schaum-Grenze begründet. Die Anwendung geeigneter Polymere und Zugabemengen führt bei Bildung kleiner stabiler Flocken der hydrophilen feinen Teilchen zu einer Verbesserung der Flotationsergebnisse.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind ein Beitrag zur Erweiterung der Kenntnisse über die Mechanismen der Trübe mitführung in mechanischen Flotationsapparaten. Sie liefern wesentliche Hinweise zur Steuerung und Reduzierung der Trübe mitführung. Aus den Schlußfolgerungen der Arbeit können wichtige Maßnahmen und Kriterien zur Optimierung der Feinstteilchenflotation bei der Aufbereitung komplex zusammengesetzter, wertstoffarmer Rohstoffe und für das Recycling von festen Abfällen abgeleitet werden.

7 Symbolverzeichnis

a	cm	Abstand der Strombrecher von der Flotationszellenecke
a_{SiO_2}	%	Quarzgehalt im Aufgabegut
a_{CaF_2}	%	Fluoritgehalt im Aufgabegut
A_Q	cm ²	Querschnittsfläche der Zelle
b	cm	Breite der Strombrecher
c	m/s, cm	Schallgeschwindigkeit im Wasser, Länge der Statorblätter (System D)
c_L		Luftströmungs-Zahl
$c_{L,1s}$		Grenz-Luftströmungs-Zahl
c_P		Leistungsbeiwert, Leistungs-Zahl
c_{SiO_2}	%	Quarzgehalt im Schaumprodukt
$C_{ij,t}$	g/cm ³	Konzentration der i -ten Teilchengröße des Feststoffs j in der oberen Schicht der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone
$C_m(t)$	mg/l	Konzentration des Feststoffes in der Trübezone nach der Flotationszeit t
$C_w(t)$	mg/l	Wassergehalt in der Trübezone nach der Flotationszeit t
$C_{w,t}$	g/cm ³	Wassergehalt in der oberen Schicht der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone bei der Flotationszeit t
CF_{ij}		Stromklassierungsfaktor der i -ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j , bezogen auf die Trübe
CR_{ij}		Stromklassierungsfaktor der i -ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j , bezogen auf die mittlere Schaumverweilzeit
d	µm, cm	Teilchengröße, Länge der Statorblätter (System D)
d_{50}, d_{90}	µm	50 %- und 90 %-Teilchengröße einer Teilchengrößenverteilung
d_{20}	µm	Trübemitführungsparameter, d.h. die Teilchengröße, bei der der Trübemitführungsfaktor 20 % ist
d_B	cm	Blasengröße
$d_{B,\text{max}}$	cm	maximale stabile Blasengröße
$d_{F,ij}$	µm	äquivalenter Durchmesser der Kugel gleicher stationärer Sinkgeschwindigkeit der i -ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j
$d_{F,\text{max}}$	µm	maximale Flockengröße
d_i	µm	Teilchengröße der i -ten Teilchengrößenklasse
d_{ij}	µm	Teilchengröße der i -ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j
d_p	µm	Teilchengröße
D_1	cm	Kantenlänge der Zellenquerschnittsfläche
D_2	cm	Rotordurchmesser
D_3	cm	Innendurchmesser des Statorrings
D_4	cm	Außendurchmesser des Statorrings
D_o		Charakteristische Abmessung des turbulenz erzeugenden Systems
D_R	mm	Weite der Rostöffnungen
D_t		turbulenter Diffusions- bzw. Transportkoeffizient des Fluids
e	cm	Länge der Statorblätter (System D)
e_{ij}		Trübemitführungsfaktor der Teilchengrößen i und/oder des Minerals j
e_{SiO_2}		Trübemitführungsfaktor des Quarzes
$e(t^*)$		Trübemitführungsfaktor nach der festgelegten Flotationszeit t^*
ENT_{ij}		Trennungskurve der i -ten Teilchengröße des Feststoffs j
f_D	Hz	Dopplerfrequenz
$f_{D\text{max}}$	Hz	maximal detektierbare Dopplerfrequenz
f_o	MHz	Grundfrequenzen
f_{prf}	Hz	Pulsfolgenfrequenz
Fr		Froude-Zahl
F_{si}		Faktor der Flockenstabilität
g	cm/s ²	Schwerebeschleunigung (= 981 cm/s ² Erdbeschleunigung)
H	cm	Trübehöhe im Prozeßraum oder Füllhöhe im begasten Zustand

H/D_1		Verhältnis Füllhöhe zu Kantenlänge der Zelle
H_1	cm	Höhe der Rotoragitationselemente (Finger)
H_2	cm	Bodenabstand der Rotorunterkante
H_{2m}	cm	Abstand zwischen Boden und Rotorscheibenmitte, Einbauhöhe des Rotors
H_{2m}/D_1	cm	Relative Einbauhöhe des Rotors
H_3	cm	Abstand zwischen der Rostunterkante und Rotoroberkante
H_4	cm	Höhe der Statorleitelemente
H_5	cm	Bodenabstand der Statorringunterkante, Einbauhöhe des Stators
H_6	cm	Bodenabstand der Rostunterkante
H_R	mm	Höhe der Rostöffnungen
H_{sch}	cm	Schaumhöhe
k	min^{-1}	Geschwindigkeitskonstante der Flotation
k_1	$\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$	Proportionalitätsparameter von α
k_2	$\text{cm}^3/(\text{g}\cdot\text{s})$	Proportionalitätsparameter von β_i
k_s	min^{-1}	Geschwindigkeitskonstante des Zurückfließens der Teilchen
k_w	min^{-1}	Geschwindigkeitskonstante der Schaumentwässerung
K_2		Flockenfestigkeitskoeffizienten
l	cm	Dicke der Rotoragitationselemente oder Fingerdurchmesser
l_D	m	<i>kolmogorovscher</i> Längenmaßstab der Mikroturbulenz
l_s	cm	Tiefe des Schaumabstreifers
L_{max}	mm	Maximale Meßlänge bzw. Eindringtiefe
m	g	Masse
m_{bt}	kg	Masse der begasten Trübe
$m_f(t_i)$	g	Fluoritmasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i
m_i	pg	Masse der Teilchen der i -ten Teilchengrößenklasse
$m_{ij, k}$	g	Masse der i -ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j im Schaumprodukt
$m_{ij, t}$	g	Masse der i -ten Teilchengrößenklasse der freien Gangartteilchen j in der Trübezone
$m_q(t_i)$	g	Quarzmasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i
$m_{w, t}$	g	Masse des Wassers in der Trübezone
$m_{w, k}$	g	Masse des Wassers im Schaumprodukt
$M_{H_2O}^{sch}(t_i)$	g	Wassermasse im Schaumprodukt nach der Flotationszeit t_i
$M_{H_2O}^t(t_i)$	g	Wassermasse der Trübe in der Flotationszelle nach der Flotationszeit t_i
n	min^{-1}	Rotordrehzahl
$n_i(y)$		Anzahlkonzentration der i -ten Teilchengrößenklasse in Abhängigkeit von der y -Koordinate, die in Kraftfeld-Richtung orientiert ist
n_{i0}		Anzahlkonzentration der i -ten Teilchengrößenklasse am Boden des Turbulentbehälter
p_k		Kapillardruck
$\sqrt{\Delta p'^2}$		Effektivwert der Druckschwankung
P	W	Wellenleistungseintrag
P_{bt}	W	Leistungseintrag an eine begaste Trübe
P_{bt}/m_{bt}	W/kg	spezifischer Leistungseintrag der begasten Trübe
P_i		Trübemitführungsfaktor der i -ten Teilchengrößen des hydrophilen Minerals
q_L	$l/(l\cdot\text{min})$	spezifischer Luftvolumenstrom
Q_{CaF_2}	g/min	mittlerer Fluoritmassenstrom ins Schaumprodukt
Q_{H_2O}	g/min	mittlerer Wassermassenstrom ins Schaumprodukt
Q_L	cm^3/s , l/s	Luftvolumenstrom
Q_s	g/min	mittlerer Feststoffmassenstrom ins Schaumprodukt
Q_{sch}	cm^3/s	Volumenstrom des Schaumproduktes
Q_{SiO_2}	g/min	mittlerer Massenstrom von Quarz $<50\ \mu\text{m}$ ins Schaumprodukt
Q_{sl}	g/min	mittlerer Trübemassenstrom ins Schaumprodukt
$Q_{Tij}(0)$	g/s	Massenstrom der i -ten Teilchengröße des Feststoffs j , der infolge der Trübemitführung die Trübe-Schaum-Grenze durchströmt
Q_w	cm^3/min	mittlerer Wasservolumenstrom ins Schaumprodukt
$Q_w(0)$	g/s	Massenstrom des Wassers, der infolge der Trübemitführung die Trübe-Schaum-

		Grenze durchströmt
$Q_{w,A}$	kg/(m ² /s)	Wasserstrom ins Schaumprodukt, bezogen auf die Querschnittsfläche der Flotationszelle
r	mm	Radius
r_w		Wirbelradius
R_{CaF_2}	%	Fluorit ausbringen durch Heterokoagulation (<i>echte Flotation</i>)
R_E	%	Feststoff ausbringen durch Einschließung
Re		<i>Reynolds-Zahl</i>
Re_{D_2}		<i>Reynolds-Zahl</i> , bezogen auf den Rotordurchmesser D_2
Re_p		<i>Reynolds-Zahl</i> , bezogen auf die Teilchengröße d_p
R_H	%	Feststoff ausbringen durch Heterokoagulation (<i>echte Flotation</i>)
$R_H(t)$	%	Feststoff ausbringen durch Heterokoagulation nach der Flotationszeit t
$R_H(t^*)$	%	Feststoff ausbringen durch Heterokoagulation nach der festgelegten Flotationszeit t^*
R_{H_2O}	%, g	Wasserausbringen
$R_{H_2O}(t)$	%	Wasserausbringen nach der Flotationszeit t
$R_{H_2O}(t^*)$	%	Wasserausbringen nach der festgelegten Flotationszeit t^*
R_m	%	Gesamtfeststoff ausbringen
$R_m(t)$	%	Gesamtfeststoff ausbringen nach der Flotationszeit t
$R_m(t^*)$	%	Gesamtfeststoff ausbringen nach der festgelegten Flotationszeit t^*
R_{mi}	%	Gesamtfeststoff ausbringen der i -ten Teilchengrößenklasse i
R_{SiO_2}	%	Quarzausbringen durch Trübe mitführung (<i>Entrainment</i>)
R_T	%	Feststoff ausbringen durch Trübe mitführung (<i>Entrainment</i>)
$R_T(t)$	%	Feststoff ausbringen durch Trübe mitführung nach der Flotationszeit t
$R_T(t^*)$	%	Feststoff ausbringen durch Trübe mitführung nach der festgelegten Flotationszeit t^*
R_{Tij}	%	Feststoff ausbringen durch Trübe mitführung der i -ten Teilchengröße des Minerals j in der Flotationszeit t , bezogen auf die Aufgabetrübe
R_W	%	Wasserausbringen, Wasserausbringen in der Flotationszeit t , bezogen auf die Trübe aufgabe
R_{wo}	%	minimales Wasserausbringen, ab dem das Feststoff ausbringen durch Trübe mitführung der i -ten Teilchengrößenklasse proportional zum Wasserausbringen ist
s	mm	Abstand zwischen Meßort und Sonde (Meßposition)
S_B	min ⁻¹	Blasenoberflächenstrom bezogen auf die Querschnittsfläche der Zelle
t	min	Flotationszeit
t^*	min	festgelegte Flotationszeit t^*
$\tan \alpha$		Tangentenanstieg der Kurve R_m versus R_{H_2O} . Das ist gleich dem Trübe mitführungsfaktor e_{ij}
t_c	min	Konditionierungszeit
t_{FAi}	min	Verweildauer der Suspension mit Quarzflocken im Flotationsapparat
Tu		Turbulenzgrad
u	cm/s	turbulente Strömungsgeschwindigkeit
\bar{u}_i	mm/s	mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der x-, y- und z-Richtung
$\bar{u}_{i,max}$	mm/s	maximal meßbare mittlere Strömungsgeschwindigkeit
$\sqrt{u_i'^2}$	mm/s	mittlerer Effektivwert der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit
$\sqrt{u_i'^2}/u_R$		mittlerer Effektivwert der turbulenten Schwankungsgeschwindigkeit bezogen auf die Rotorumfangsgeschwindigkeit
u_L	cm/s	Luftleerrohrgeschwindigkeit
\bar{u}_{max}	mm/s	maximal meßbare Strömungsgeschwindigkeit;
u_o	cm/s	Charakteristische Geschwindigkeit des turbulenz erzeugenden Systems
u_R	cm/s	Rotorumfangsgeschwindigkeit
u_{ww}	l/(m ² ·s)	Waschwasserleerrohrgeschwindigkeit
v_m	cm/s	stationäre Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens
v_{max}	mm/s	maximale, durch das Meßgerät UVP-X-3 meßbare Strömungsgeschwindigkeit

v_{mi}	cm/s	stationäre Sinkgeschwindigkeit der i-ten Teilchengrößenklasse
v_s	mm/s	Geschwindigkeit entlang des ausgesandten Ultraschallstrahls, Sinkgeschwindigkeit der Grenzfläche Sedimentationszone/Klarflüssigkeitszone
V_{bt}	l	Volumen der begasten Trübe
V_{ef}	l	effektives Trübevolumen der Flotationszelle
V_{lsch}	cm ³	Volumen der Flüssigkeit im Schaum
We, We_c		Weber-Zahl bzw. kritische Weber-Zahl
$X(0)$		Übergangsfaktor der ausgebrachten Teilchen durch Trübemitführung in der Flotationszeit $t = 0$
$X(t)$		Übergangsfaktor der ausgebrachten Teilchen durch Trübemitführung in der Flotationszeit t
X_{ij}		Stromklassierungsfaktor der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffes j, der durch Trübemitführung ins Schaumprodukt ausgebracht wird
$Y(t)$		Übergangsfaktor der ausgebrachten Teilchen durch Trübemitführung und Heterokoagulation in der Flotationszeit t
z	cm	Anzahl, Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze
z_L		Anzahl der Statorringelemente oder Blätterzahl
z_R		Anzahl der Rotoragitationselemente oder Fingerzahl
z_S		Anzahl der Strombrecherblätter
α	s ⁻¹	Schaumentwässerungsparameter
β	°	Winkelkoordinaten
β_t	s ⁻¹	Parameter des durch Schaumentwässerung verursachten Rückflusses der Feststoffteilchen
δ		Schaumentwässerungsparameter
Δt	s	Zeit zwischen dem ausgesandten Schallimpuls und dem empfangenen Streusignal
$\Delta \bar{u}_i$	mm/s	Auflösung der Geschwindigkeitswerte
ε	W/kg	örtliche Dissipationsrate
$\bar{\varepsilon}$	W/kg	mittlere Dissipationsrate (spezifischer Leistungseintrag der Flotationszelle)
γ	g/cm ³	Feststoffdichte
η	mPa·s	Scheinbare Viskosität
φ	%	Feststoffvolumenanteil in der Suspension
λ	s	Verweilzeit der Teilchen in der Schaumzone, Wellenlänge der Turbulenzelemente
Λ	m	Makromaßstab der Turbulenz
μ	%	Feststoffmasseanteil in der Suspension oder in der Trübe
μ_{bt}	%	Feststoffmasseanteil in der begasten Trübe
μ_j	%	Masseanteil der Komponente j in der Suspension oder in der Trübe
μ_{SiO_2}	%	Quarzmasseanteil in der Suspension oder in der Trübe
μ_{su}	%	Feststoffmasseanteil in der Suspension oder in der Trübe
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
θ	°	polare Winkelkoordinate, Randwinkel
ρ	g/cm ³	Fluiddichte
ρ_{bt}	g/cm ³	Trübedichte der begasten Trübe
ρ_f	g/cm ³	Fluoritdichte
ρ_{H_2O}	g/cm ³	Wasserdichte
ρ_j	g/cm ³	Dichte des Feststoffs j
ρ_q	g/cm ³	Quarzdichte
ρ_s	g/cm ³	Feststoffdichte
ρ_{su}	g/cm ³	Trübedichte
σ_{lg}	N/m	Oberflächenspannung
τ_{sch}	s	mittlere Schaumverweilzeit
ψ		Teilchenformfaktor
ζ_j	mV	Zeta-Potential des Feststoffs j (Quarz SiO ₂ und Fluorit CaF ₂)

Indizes

A	Aufgabe, Fläche, flächebezogen
B	Blase
c	kritischer Wert, Konditionierung
bt	begaste Trübe
E	Einschließung
F	Flocken
FA	Flotationsapparat
H	Heterokoagulation
i	Merkmalklasse
j	Komponenten
k	kritischer Wert
lg	Flüssigkeit-Gas Phasen, flüssig-gasförmig
ls	Trübe, Flüssigkeit-Feststoff
L	Luft, Statorblätter
m	Feststoff, Mineral
max	maximale
P	Partikel, Teilchen
R	Rotorfinger, Rost
s	Feststoff, Strombrecherblätter, Schaumabstreifer, Zurückfließen des Feststoffs, Stabilität
su	Suspension
sch	Schaum
t	Trübe
T	Trübemithführung
w	Wasser, Wirbel, Schaumentwässerung
ww	Waschwasser
1s	1s-Kriterium
x, y, z	Raumkoordinaten in der Flotationszelle

Abkürzungen

A, B, C, D	Zellenbauart
A2o, A2m, A2u	Meßort der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der mittleren
B2o, B2m, B2u, B3o	Effektivwerte der turbulenten Schwankungsbewegung
C1o, C1m, C1u	
FA bzw. FB	Meßortreihe der Feststoffkonzentrationsprofile in der Flotationszelle
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LSV	Laser-Speckle-Velocimetrie
MIBC	Metylisobutylcarbinol
RA bis RK	Rosttypen
S	Schaumentwässerung
Q ₁	Kennzeichnung der Quarzprobe mit $d_{90} = 29,4 \mu\text{m}$
Q ₂	Kennzeichnung der Quarzprobe mit $d_{90} = 11,3 \mu\text{m}$
185K, 187K und 655BC	kationische Polymere
2440 und A3040L	anionischen Polymere

8 Literaturverzeichnis

- [1] Schubert, H.: Aufbereitung fester Stoffe. Band II, 4. Aufl., Stuttgart, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1996, S. 240–453.
- [2] Fuerstenau, D.W.: Fine particle flotation. In: Fine particle processing (Hg. P. Somasundaran), SME-AIME, Littleton, 1980, Vol. 1, S. 669–705.
- [3] Laskowski, J.S.: An Introduction: physicochemical methods of separation. In: Colloid chemistry in mineral processing (Hg. J.S. Laskowski and J. Ralston), Elsevier, Amsterdam, 1992, Kap. 7, S. 225–241.
- [4] Klassen, V.I., u. V.A. Mokrousov: An introduction to the theory of flotation. Butterworths, London, 1963, S. 353–385.
- [5] Matis, K.A., u. A.I. Zouboulis: An overview of the process. In: Flotation science and engineering (Hg. K.A. Matis), Marcel Dekker, New York, 1995, Kap. 1, S. 1–44.
- [6] Ahmed, N., u. G.J. Jameson: The effect of bubbles size on the rate of flotation of fine particles. Int. J. Miner. Process., 14 (1985), S. 195–215.
- [7] Sivamohan, R.: The problem of recovering very fine particles in mineral processing – a review. Int. J. Miner. Process., 28 (1990), S. 247–288.
- [8] Somasundaran, P.: An overview of the ultrafine problem. In: Mineral processing at a crossroads – problems and prospects (Hg. B. A. Wills und R.W. Barley), NATO Advanced Institute, Cornwall, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986, S. 1–36.
- [9] Subrahmanyam, T. V., u. K.S.E. Forssberg: Fine particles processing: shear-flocculation and carrier flotation – a review. Int. J. Miner. Process., 30 (1990), S. 265–286.
- [10] Trahar, W.J.: A rational interpretation of the role of particle size in flotation. Int. J. Miner. Process., 8 (1981), S. 289–327.
- [11] Trahar, W.J., u. L.J. Warren: The flotability of very fine particles - a review. Int. J. Miner. Process., 3 (1976), S. 103–131.
- [12] Uhlig, D.: Flotationsverfahren für feine und feinste Körnungen. Neue Bergbautechnik, 14 (1984) 1, S. 30–35.
- [13] Warren, L.J.: Ultrafine particles flotation. In: Principles of mineral flotation - The Wark Symp. (Hg. M.H. Jones und J.T. Woodcock), AusIMM, Victoria, Australia, 1984, S. 185–213.
- [14] Schubert, H.: On the turbulence-controlled microprocesses in flotation machines. Int. J. Miner. Process., 56 (1999), S. 257–276.
- [15] Schubert, H., u. C. Bischofberger: On the microprocesses air dispersion and particle-bubble attachment in flotation machines as well as consequences for the scale-up of macroprocesses. Int. J. Miner. Process., 52 (1998), S. 245–259.
- [16] Weiß, Th., u. H. Schubert: The effects of fine particle on the hydrodynamics of flotation. In: Proc. XVI. Int. Mineral Process. Congr., Stockholm, Sweden, (Hg. E. Forssberg), Elsevier, Amsterdam, 1988, Part A, S. 807–818.
- [17] Weiß, Th., u. H. Schubert: Der Einfluß des Feinstkorns auf die Turbulenz der Mehrphasenströmung fest/flüssig. In: Preprints 4. Eur. Symp. Partikelmeßtechnik, Nürnberg, 1989, Teil 2, S. 679–693.
- [18] Deglon, D.A., u. C.T. O'Connor: Hydrodynamic investigation of fine particle flotation on a conventional flotation cell. In: Proc. XX. Int. Mineral Process. Congr., Aachen, GDMB, Clausthal-Zellerfeld, 1997, Band 3, S. 167–174.
- [19] Ata, S., u. N. Ahmed: The effect of hydrophobic particles on the entrainment of hydrophilic particles. In: Innovations in mineral and coal processing (Hg. S. Atak, G. Önal und M. Çelik), A.A. Balkema, Rotterdam, 1998, S. 147–152.
- [20] Gülsoy, Ö.Y., Ersayin, S., u. F. Şahim: Modeling water recovery in flotation. In: Innovations in mineral and coal processing (Hg. S. Atak, G. Önal und M. Çelik), A.A. Balkema, Rotterdam, 1998, S. 585–589.

- [21] Savassi, O.N., Alexander, D.J., Franzidis, J.P., u. E.V. Manlapig: An empirical model for entrainment in industrial flotation plants. *Minerals Engng.*, 11 (1998) 3, S.243-256.
- [22] Kirjavainen, V.M.: Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals. *Int. J. Miner. Process.*, 46 (1996), S. 21-34.
- [23] Savassi, O.N., Manlapig, E.V., u. J.P. Franzidis: A simple model for entrainment in conventional flotation cells. In: *Anais do XVI Enc. Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia* (Hg. A.J.B. Dutra, A.B. da Luz, M.L. Toren), CETEM/CNPq, UFRJ, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 1995, Band 1, S. 486-499.
- [24] Drzymala, J.: Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 3: Maximum size of floating and interacting particles. *Int. J. Miner. Process.*, 55 (1999), S. 203-218.
- [25] Drzymala, J.: Technical note – Entrained particles with density between 1.01 and 1.10 g/cm³ in a monobubble Hallimond flotation tube. *Minerals Engng.*, 12 (1999) 3, S. 329-331.
- [26] Drzymala, J.: Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 2: Maximum size of floating particles and contact angle. Erratum. *Int. J. Miner. Process.*, 43 (1994), S. 135.
- [27] Drzymala, J.: Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 2: Maximum size of floating particles and contact angle. *Int. J. Miner. Process.*, 42 (1994), S. 153-167.
- [28] Drzymala, J.: Characterization of materials by Hallimond tube flotation. Part 1: Maximum size of entrained particles. *Int. J. Miner. Process.*, 42 (1994), S. 139-152.
- [29] Kirjavainen, V.M., u. H.R. Laapas: A study of entrainment mechanism in flotation. In: *Proc. XVI. Int. Mineral Process. Congr.*, Stockholm, Sweden, (Hg. E. Forssberg), Elsevier, Amsterdam, 1988, Part A, S. 665-677.
- [30] Kirjavainen, V.M., Laapas, H.R., u. K.G.H. Heiskanen: The effect of some factors on the entrainment mechanism in froth flotation. *Preprints XVII. Int. Mineral Process. Congr.*, Dresden, 1991, Band II, S. 217-226.
- [31] Kirjavainen, V.: Study on entrainment mechanism in dispersed flotation suspensions. *Acta Polytechnica Scandinavica. Chemical Technology and Metallurgy Series*, Nr. 206 (1992), S. 1-51. (Dissertation Nr. 845, Helsinki University of Technology)
- [32] Wark, I. W.: The entrainment difficulty in flotation experiments. *Colloids and Surfaces*, 2 (1981), S. 193-194.
- [33] Warren, L.J.: Determination of the contributions of true flotation and entrainment in batch flotation tests. *Int. J. Miner. Process.*, 14 (1985), S. 33-44.
- [34] Ross, V.E.: Determination of the contributions by true flotation and entrainment during the flotation process. In: *Proc. Colloquium Developments in froth flotation*, Gordon's Bay, South Afrika 1989, South Afrika Inst. of Min. and Metall., 1989, 30 S..
- [35] Ross, V.E.: Comparison of methods for evaluation of true flotation and entrainment. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 100 (1991), S. C121-C126.
- [36] Ross, V.E.: Flotation and entrainment of particles during batch flotation tests. *Minerals Engng.*, 3 (1990) 3/4, S. 245-256.
- [37] Ross, V.E.: The behaviour of particles in flotation froths. *Minerals Engng.*, 4 (1990) 7-11, S. 959-974.
- [38] Ross, V.E.: Mass transport in flotation froth. Ph. D. Thesis, University of Stellenbosch, 1988, 488 S..
- [39] Hanumanth, G.S., u. D.J.A. Williams: An experimental study of the effects of froth height on flotation of China Clay. *Powder Technology*, 60 (1990), S. 131-144.
- [40] Govindarajan, B., Vanagamudi, M., u. T.C. Rao: Batch coal flotation model based on

- water recovery concept. *Minerals and Metall. Process.*, 8 (1991) 2, S. 105-109.
- [41] *Vanagamudi, M., u. T.C. Rao*: Development of an index for the floatability of indian coal fines. *Minerals Engng.*, 2 (1989) 4, S. 511-519.
- [42] *Smith, P.G., u. L.J. Warren*: Entrainment of particles into flotation froths. *Miner. Process. Extr. Metall. Review*, 5 (1989), S. 123-145.
- [43] *Laplante, A.R., Kaya, A.R., u. H.W. Smith*: The effect of froth on flotation kinetics - a mass transfer approach. *Miner. Process. Extr. Metall. Review*, 5 (1989), S. 147-168.
- [44] *Kawatra, S.V. u. Eisele, T.C.*: Recovery of pyrite in coal flotation: entrainment or hydrophobicity? *Minerals and Metall. Process.*, (May 1992), S. 57-61.
- [45] *Subrahmanyam, T.V., u. E. Forssberg*: Froth stability, particle entrainment and drainage in flotation - a review. *Int. J. Miner. Process.*, 23 (1988), S. 33-53.
- [46] *Subrahmanyam, T.V., u. E. Forssberg*: A Study of particle entrainment in flotation with different frothers – the case of cooper ore. In: *Proc. XVI. Int. Mineral Process. Congr.*, Stockholm, Sweden, (Hg. E. Forssberg), Elsevier, Amsterdam, 1988, Part A, S. 785-796.
- [47] *Subrahmanyam, T.V., u. E. Forssberg*: Frother performance in flotation of cooper and lead-zinc ores. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 97 (1988), S. C134-C142.
- [48] *Mitrofanov, S.I., Kuz'kin, A.S., u. V.N. Filimonov*: Theoretical and practical aspects of using combinations of collectors and frothing agents for sulphide flotation. In: *Proc. XV. Int. Mineral Process. Congr.*, Cannes, 1985, Tome II, S. 65-73.
- [49] *Thorne, G.C., Manlapig, E.V., Hall, J.S., u. A.J. Lynch*: Modelling of industrial sulphide flotation circuits. In: *Flotation-A.M. Gaudin Memorial Volume* (Hg. M.C.Fuerstenau), AIME, New York, 1976, Band 2, Kap. 26, S. 725-752.
- [50] *Lynch, A.J., Johnson, N.W., Manlapig, E.V., u. C.G. Thorne*: Mineral and coal flotation circuits- their simulation and control. Elsevier, Amsterdam, 1981, 291 S..
- [51] *Bisshop, J.P., u. M.E. White*: Study of particle entrainment in flotation froths. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 85 (1976), S. C191-C194.
- [52] *Johnson, N.W., Mckee, D.J., u. A.J. Lynch*: Flotation rates of nonsulfide minerals in chalcopyrite flotation processes. *Trans. AIME*, 256 (1974) 3, S. 204-209.
- [53] *Engelbrecht, J.A., u. E.T. Woodburn*: The effects of froth height, aeration rate, and gas precipitation on flotation. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, (1975), S. 125-132.
- [54] *Jowett, A.*: Kinetics flotation: gangue mineral contamination of froth. *British Chemical Engng.*, 2 (1966) 5, S. 330-333.
- [55] *Maachar, A., u. G.S. Dobby*: Measurement of feed water recovery and entrainment solids recovery in flotation columns. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 31 (1992) 3, S. 167-172.
- [56] *Falutsu, M.*: Column flotation froth characteristics - stability of the bubble-particle system. *Int. J. Miner. Process.* 40 (1994) 3/4, S. 225-243.
- [57] *Falutsu, M., u. G.S. Dobby*: Froth performance in commercial sized flotation columns. *Minerals Engng.*, 5 (1992) 10-12, S. 1207-1223.
- [58] *Tao, D., Luttrell, G.H., u. R.-H. Yonn*: A parametric study of froth stability and its effect on column flotation of fine particles. *Int. J. Miner. Process.*, 59 (2000), S. 25-43
- [59] *Ityokumbul, M.T., de Aquino, J.A., O' Connor, C.T., u. M.C. Harris*: Fine pyrite in an agitated column cell. *Int. J. Miner. Process.*, 58 (2000), S. 167-178.
- [60] *Tuteja, R.K., Spottiswood, D.J., u. V.N. Misra*: Column parameters: their effect on entrainment in froth. *Minerals Engng.*, 8 (1995) 11, S. 1359-1368.
- [61] *Finch, J.A., u. G.S. Dobby*: *Column Flotation*. Oxford, Pergamon Press, 1990, 176 S..
- [62] *Rubinsteinen, J.B.*: *Column Flotation. Process, Designs and Practices*. Gordon and Breach Science Publishers, 1994, 312 S..
- [63] *Stonestreet, P., u. J.-P. Franzidis*: Development of the reverse coal flotation process:

- application to column cells. *Minerals Engng.*, 5 (1992) 9, S. 1041-1051.
- [64] *Schubert, H.*: Gegenstrom-Flotationsapparate (Flotationskolonnen) Entwicklungsstand und -tendenzen. *Aufbereitungs-Technik*, (1988) 6, S. 307-315.
- [65] *Ross, V.E.*: An investigation of sub-processes in equilibrium froths (II): The effects of operating conditions. *Int. J. Miner. Process.*, 31 (1991), S. 51-71.
- [66] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Froth washing and froth vibration in mechanical flotation machines. In: Preprint SME Annual Meeting, Salt Lake City, Utah, USA, SME, Littleton, 1990, Preprint Number 90-30, 11 S..
- [67] *Cilliers, J.J., Asplin, R.A., u. E.T. Woodburn*: Kinetic flotation modelling using froth imaging data. In: *Frothing in flotation II* (Hg. J.S. Laskowski und E.T. Woodburn), Gordon and Breach, Amsterdam, 1998, S. 309-335.
- [68] *Szatkowski, M.*: Factors influencing behaviour of flotation froth. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, 96 (1987), S.C115-C122.
- [69] *Goodall, C.M., Barker, A.M., u. C.T. O'Connor*: Investigation of a Pyrite-quartz flotation froth by use of a novel froth-splitting apparatus. *Int. J. Miner. Process.*, 24 (1988), S. 307-317.
- [70] *Kaya, M.*: Froth washing in mechanical flotation cells. Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 1989, 430 S..
- [71] *Ross, V.E.*: Mechanisms operating in flotation froths. In: *Frothing in flotation II* (Hg. J.S. Laskowski und E.T. Woodburn), Gordon and Breach, Amsterdam, 1998, Kap. 4, S. 109-144.
- [72] *Hemmings, C.E.*: An alternative viewpoint on flotation behaviour of ultrafine particles. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Miner. Process. Extr. Metall.)*, 89 (1980), S. C113-C120.
- [73] *Woodburn, E.T., Robbins, D.J., u. J.B. Stockton*: Separation ultrafine coal particles by the froth flotation process. *Filtration and Separation*, (March 1987), S. 89-96.
- [74] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Froth washing in mechanical flotation cells. In: *Proc. 21. Canadian Mineral Processors Annual Confer.*, CIM, Ottawa, Canada, 1989, Paper N°. 27, S. 497-541.
- [75] *Gaudin, A.M.*: Flotation. 2. Auflage, New York, McGraw-Hill, 1957, S. 327-368.
- [76] *Taggart, A.F.*: Handbook of Mineral Dressing. 5. Auflage, New York, John Wiley & Sons, 1953, S. 12-52 bis 12-54.
- [77] *Sutherland, K.L., u. I.W. Wark*: Principles of Flotation. Melbourne, AusIMM, 1955. 489 S..
- [78] *Moys, M.H.*: A study of a plug-flow model for froth behaviour. *Int. J. Miner. Process.*, 5 (1978), S. 21-28.
- [79] *Flynn, S.A., u. E.T. Woodburn*: Development of a froth model for fine particle beneficiation by flotation. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.)*, 96 (1987), S. C191-C198.
- [80] *Schubert, H., u. Th. Neeße*: The role of turbulence in wet classification. In: *Proc. X. Int. Mineral Process. Congr.*, London, 1974, S. 213-239.
- [81] *Schubert, H.*: Die Modellierung des Flotationsprozesses auf hydrodynamischer Grundlage. *Neue Bergbautechnik*, 7 (1977) 6, S. 446-456.
- [82] *Schubert, H.*: Role of turbulence in mineral processing unit operation. In: *Challenges in mineral processing*, Proc. Symp. honoring D.W. Fuerstenau, Berkeley, SME, Littleton, 1989, S. 272-289.
- [83] *Schubert, H., u. K. Mühle*: The role of turbulence in unit operations of particle technology. In: *Preprints 2. World Congr. Particle Technology*, Kyoto 1990, Part III, S. 55-67.
- [84] *Schubert, H.*: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band I, 4. Aufl., Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1989, S. 238-268.

- [85] *Schubert, H.*: Zur prozeßbestimmenden Rolle der Turbulenz bei Aufbereitungsprozessen: 1. Teil. Aufbereitungs-Technik, 15 (1974) 9, S. 501-512.
- [86] *O'Connor, C.T., u. P.J.T. Mills*: The effect of temperature on the pulp and froth phases in the flotation pyrite. Minerals Engng., 3 (1990) 6, S. 615-624.
- [87] *Cutting, G.W.*: Effect of froth structure and mobility on plant performance. Mineral Process. and Extr. Metall. Review, 5 (1989), S. 169-201.
- [88] *Moys, M.H.*: Residence time distributions and mass transport in the froth phase of the flotation process. Int. J. Miner. Process., 13 (1984), S. 117-142.
- [89] *Moys, M.H.*: Mass transport in flotation froths. Mineral Process. and Extr. Metall. Review, 5 (1989), S. 203-228.
- [90] *Laplante, A.R., Toguri, J.M., u. H.W. Smith*: The effect of air flow rate on the kinetics of flotation. Part 1: The transfer of Material from the slurry to the froth. Int. J. Miner. Process., 11 (1983) 3, S. 203-219.
- [91] *Harris, C.C., Arbiter, N., u. M.J. Musa*: Mixing and Gangue dispersion in flotation machine pulps. Int. J. Mineral Process., 10 (1983), S. 45-60.
- [92] *Schubert, H., u. C. Bischofberger*: On the optimization of hydrodynamics of flotation. In: Proc. XIII. Int. Mineral Process. Congr., Warsaw 1979, Elsevier, Amsterdam, 1981, Part B, S. 1261-1284.
- [93] *Schubert, H.*: On the hydrodynamics and the scale-up of flotation processes. In: Advances in mineral processing, (Hg. P. Somasundaran), AIME, New York, 1986, S. 636-649.
- [94] *Schubert, H.*: Zur prozeßbestimmenden Rolle der Turbulenz bei Aufbereitungsprozessen: 2. Teil. Aufbereitungs-Technik, 15 (1974) 12, S. 680-685.
- [95] *Mavros, P.*: Mixing and hydrodynamics in flotation cells. In: Innovations in flotation technology (Hg. P. Mavros and K.A. Matis), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992, S. 211-234. (NATO ASI Series: Serie E, Applied Sciences, vol. 208)
- [96] *Bischofberger, C., u. H. Schubert*: Untersuchung zur hydrodynamischen Optimierung des Flotationsprozesses bei der Kalisalzflotation. Neue Bergbautechnik, 10 (1980) 1, S. 58-63.
- [97] *Bischofberger, C., u. H. Schubert*: Zum Einfluß der Hydrodynamik in Flotationsapparaten auf die Flotierbarkeit unterschiedlichen Korngrößen. Freiburger Forsch.-H., A 594 (1978), S. 77-92.
- [98] *Schubert, H., u. C. Bischofberger*: On the hydrodynamics of flotation machines. Int. J. Miner. Process., 5 (1978), S. 131-142.
- [99] *Stoev, S. M., u. D. Watson*: Influence of ultrasonic vibrations on secondary concentration of mineral in a froth. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Mineral Process. and Extr. Metall.), 76 (1967), S. C284-C286.
- [100] *Krishnan, S.W., u. I. Iwasaki*: Heterocoagulation versus surface precipitation in quartz-Mg(OH)₂ system. Preprints Annual Meeting SME-AIME, Littleton, 1983, Preprint Number 83-113, 8 S..
- [101] *Waksmundzki, A., Neczaj-Hruzewicz, J., u. M. Planik*: Mechanism of carryover of gangue slimes during flotation of sulphur ore. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect.C: Mineral Process. Extr. Metall.), 81 (1972), S. C249-C251.
- [102] *Yousef, A.A., Arafa, M.A., u. T.R. Boulos*: Influence of manganese dioxide slimes on quartz flotation. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.), 80 (1971), S. C223-C227.
- [103] *Waksmundzki, A., Neczaj-Hruzewicz, J., u. M. Planik*: Slime coatings formation and their properties in the sulphur-calcit system. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.), 80 (1971), S. C200-C203.
- [104] *Çelik, M.S., Elma, I., Hançer, M., u. J. D. Miller*: Effect of in-situ ultrasonic treatment on the floatability of slimes coated colemanite. In: Innovations in mineral and coal

- processing (Hg. S. Atak, G. Önal und M. Çelik), A.A. Balkema, Rotterdam, 1998, S. 153-157.
- [105] *Szczypa, J.; Neczay-Hruzewicz, J., u. J. Sablik*: Some properties of slime coatings in coal-gangue systems. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.), 82 (1973), S. C167-C169.
- [106] *Ajersch, M.J.*: Mechanism of pulp loss in flotation deinking. Ph.D. Thesis, McMaster University, Canada, 1997, 283 S. (Zusammenfassung aus DAI-B 59/08, S.4277, Feb. 1999).
- [107] *Drzymala, J., Chmielewski, T., Wolters, K.L., Birlingmair, D.H., u. T.D. Wheelock*: Microflotation measurement based on modified Hallimond tube. Trans. Inst. Min. Metall. (Sect.C: Miner. Process. Extr. Metall.), 101 (1992), S. C17-C24.
- [108] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Investigation of Beach and Continuous Flotation Kinetics in a modified Denver Laboratory Cell. Canadian Metallurgical Quarterly, 25 (1986) 1, S. 1-8.
- [109] *Harris, M.C., Franzidis, J-P., O'Connor, C.T., u. P. Stonestreet*: An evaluation of the role of particle size in the flotation of coal using different cell technologies. Minerals Engng., 5 (1992) 10-12, S. 1225-1238.
- [110] *Obers, H., Hoberg, H., u. F.U. Schneider*: Improvement of the flotation process by modification of the froth system. In: Proc. XVI. Int. Mineral Process. Congr., Stockholm, (Hg. E. Forssberg), Elsevier, Amsterdam, 1988, Part A, S. 727-738.
- [111] *Subrahmanyam, T.V., u. E. Forssberg*: Froth characteristics and grade-recovery relationships in the flotation of lead-zinc and copper ores. Minerals Engng., 1 (1988) 1, S. 41-52.
- [112] *Ross, V.E., u. J.S.J. van Deventer*: Mass transport in flotation column froths. In: Column Flotation '88, Proc. Int. Symp. (Hg. K.V.S. Sastry), SME, Littleton, 1988, S. 129-139.
- [113] *Franzidis, J-P., u. E.V. Manlapig*: A new, comprehensive and useful Model for flotation. In: Advances in flotation technology (Hg. B.K. Parekh and J.D. Miller), SME, Littleton, 1999, S. 413-423.
- [114] *Asplin, R.A., Sadr-Kazemi, N., u. J.J. Cilliers*: The effect of surfactant concentration on batch flotation mineral flux and froth structure. Minerals Engng., 11 (1998) 3, S. 257-269.
- [115] *Livshits, A.K., u. R.M. Bezrodnaya*: Rate of water and solids passage into flotation froth. Tsvetnye Metally, N.Y., 2 (1961) 11, S. 14-16.
- [116] *Lynch, A.J., Johnson, N.W., McKee, D.J., u. G.C. Thorne*: The behaviour of minerals in sulphide flotation processes, with reference to simulation and control. J.S. Afr. Inst. Min. Metall., (April 1974), S. 349-361.
- [117] *Kirjavainen, V.M.*: Mathematical model for the entrainment of hydrophilic particles in froth flotation. Int. J. Miner. Process, 35 (1992), S. 1-11.
- [118] *Harris, M.C.*: The use of flotation plant data to simulate flotation circuits. In: Preprints Minerals Processing Design school, The S. Afr. Inst. Min. Metall., Sept. 1998, 31 S..
- [119] *Kirjavainen, V.M.*: Application of a probability model for the entrainment of hydrophilic particles in froth flotation. Int. J. Miner. Process., 27 (1989), S. 63-74.
- [120] *Nicol, S.K., u. C.N. Bensley*: Recent developments in fine coal preparation in Australia. In: Industrial practice of fine coal processing (Hg. R.R. Klimpel und P.T. Luckie), SME, Littleton, 1988, Kap. 17, S. 147-158.
- [121] *Degner, V.R., u. P.L. Person*: Leeds column performance evaluation. Minerals Engng., 4 (1991) 7-11, S. 935-950.
- [122] *Stoev, St., Kuzev, L., Metodiev, M., u. Sht. Djendova*: Vibroacoustic improvements of froth flotation. In: Innovations in Flotation Technology (Hg. P. Mavros and K.A. Ma-

- tis), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992, S. 383-407. (NATO ASI Series: Serie E, Applied Sciences, vol. 208)
- [123] *Woodburn, E. T., Austin, L.G., u. J.B. Stockton*: A froth based flotation kinetic model. Chem. Eng. Research and Design, 72 (1994) A2, S.211-226.
- [124] *Flynn, S.A., u. E.T. Woodburn*: A froth ultrafine model for the selective separation of coal from mineral in a dispersed air flotation cell. Powder Technology, 49 (1987) 2, S. 127-142.
- [125] *Ross, V.E.*: A study of the froth phase in large-scale pyrite flotation cells. Int. J. Miner. Process., 30 (1990) 1-2, S. 143-157.
- [126] *Moudgil, B.M.*: Correlation between froth viscosity and flotation efficiency. Minerals Metall. Process., (May 1993), S. 100-101.
- [127] *Malysa, K.*: Water contents and distribution in flotation froths. In: Frothing in flotation II (Hg. J.S. Laskowski und E.T. Woodburn), Gordon and Breach, Amsterdam, 1998, Kap. 3, S. 81-108.
- [128] *Dell, C.C.*: The effect of solids concentration on flotation. Coal Preparation, (May/June 1968), S. 101-103.
- [129] *Kaya, M., u. a.*: Plant applications of froth washing in mechanical flotation Cells. In: Proc. 22. Annual Meeting Canadian Mineral Processors Conf., CIM, Canada, 1990, Paper N°. 7, S. 160-197.
- [130] *Schulze, H.-J.*: Physico-chemical elementary processes in flotation. Amsterdam, Elsevier, 1984, 348 S.. (Developments in mineral processing, 4)
- [131] *Koivistoinen, P., Lindsberg, R., Knuutinen, T., u. H. Hokka*: HG (High Grade) flotation machine – Improvement in cleaning circuit efficiency. In: Preprints XVII. Int. Mineral Process. Congr., Dresden, 1991, Band II, S. 227-236.
- [132] *Hemmings, C.E.*: On the significance of flotation froth liquid lamella thickness. Trans. Inst. Min. Metall. (Sect.C: Miner. Process. Extr. Metall.), 90 (1981), S. C96-C102.
- [133] *Wrobel, S.A.*: Flotation frothers, their action, composition, properties and structure. In: Proc. Recent developments in mineral dressing, IMM, London, 1953, S. 431-450.
- [134] *Moolman, D.W., Eksteen, J.J., Aldrich, C., u. J.S.J. van Deventer*: The significance of flotation froth appearance for machine version control. Int. J. Miner. Process., 48 (1996), S. 135-158.
- [135] *Johansson, G., u. R.J. Pugh*: The influence of particle size and hydrophobicity on the stability of mineralized froths. Int. J. Miner. Process., 34 (1992), S.1-21.
- [136] *Lovell, V.M.*: Froth characteristics in phosphate flotation. In: Flotation – A.M. Gaudin Mineral Volume (Hg. M.C.Fuerstenau), SME-AIME, 1976, Band 1, Kap. 22, S. 597-621.
- [137] *Dippenaar, A.*: The destabilization of froth by solids. I. The mechanism of film rupture. Int. J. Miner. Process., 9 (1982), S. 1-14.
- [138] *Dippenaar, A.*: The destabilization of froth by solids. II. The ratedetermining step. Int. J. Miner. Process., 9 (1988), S. 15-22.
- [139] *Geidel, T.*: Theoretische Untersuchungen zur Verweilzeit eines Schaumelements im Schaum von Flotationsapparaten. Neue Bergbautechnik, 12 (1982) 9, S.524-528.
- [140] *Lekki, J. u. J. Laskowski*: A new concept of frothing in flotation systems and general classification of flotation frothers. In: Preprints Int. Miner. Process. Congr., Cagliari, 1975, Paper 15, 22 S..
- [141] *Banford, A.W., Aktas, Z., u. E.T. Woodburn*: Interpretation of the effect of froth structure on the performance of froth flotation using image analysis. Powder Technology, 98 (1998), S. 61-73.
- [142] *Livshits, A.L., u. S.V. Dudenkov*: The influence of the solid phase on the froth stability. Tsventn. Metall., 33 (1960), S. 23-27.
- [143] *Livshits, A.L., u. S.V. Dudenkov*: Some factors in flotation froth stability. In: Proc. VII

- Int. Miner. Process. Congr. (N. Arbiter, Hg.), New York, Gordon and Breach, 1965, S. 367-371.
- [144] *Engel, M.D., u. J.B. Smithham*: The relationship between coal particle size and hydrophobicity in the formation of particle-stabilised froths. The AusIMM Bulletin and Proc., 293 (1988) 4, S. 63-66.
- [145] *Bayraktar, I, Aslan, A., u. S. Ersayin*: Effects of primary slime and clay on selectivity of flotation of sub-volcanogenic, complex, polymetallic ores. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C: Mineral Process. Extr. Metall.), 107 (1998), S. C71-C76.
- [146] *Ross, V.E.*: An investigation of sub-processes in equilibrium froths (I): the mechanisms of detachment and drainage. Int. J. Miner. Process., 31 (1991), S. 37-50.
- [147] *Finch, J.A.*: Column flotation: a selected Review-Part. IV: Novel Flotation devices. Minerals Engng., 8 (1995) 6, S. 587-602.
- [148] *Jameson, G.J.*: Flotation Cell development. In: Proc. Annual. Conf. AusIMM, Broken Hill, 1992, S. 25-31.
- [149] *Schoenherr, J.I., u. R.H. Yoon*: Neue Erkenntnisse auf dem Gebiet der kolonnen Flotation. In: Berg- und Hüttenmännischer Tagung. TU Bergakademie, Kolloquium 8, 1995, Vortrag V28, S. V28.1-V28.11.
- [150] *Imhof, R.*: Fünf Jahre Ekoflot: die pneumatische Flotation auf dem Vormarsch. Aufbereitungs-Technik, 34 (1993) 5, S. 263-268.
- [151] *Evans, G.M., Atkinson, B.W., u. G.J. Jameson*: The Jameson Cell. In: Flotation science and engineering (Hg. K.A. Matis), Marcel Dekker, New York, 1995, S. 331-363.
- [152] *Firth, B.A.*: Australian Coal flotation practice. In: Advances in flotation technology (Hg. B.K. Parekh und J.D. Miller), SME, Littleton, 1999, S. 289-307.
- [153] *Houster, R.Q., Patwardhon, A., Mohanty, M.K., u. K.U. Bhaskar*: Fine coal cleaning using Jameson Cell: The North American experience. In: Advances in flotation technology (Hg. B.K. Parekh u. J.D. Miller), SME, Littleton, 1999, S. 331-338.
- [154] *Alizadeh, A., u. W. Simonis*: Flotation von Feinst- und Ultra-Feinstkohlepartikeln. Aufbereitungs-Technik, (1985) 6, S. 363-367.
- [155] *Terblanche, A.N., Grobler, W.A., Önal, G., u. A. Güney*: Turbo flotation column with enhanced flotation performance. In: Proc. 7. Int. Mineral Process. Symp., Innovations in mineral and coal processing (Hg. S. Atak, G. Önal and M.S. Celik), A.A.Balkema, Rotterdam, 1998, S. 257-262.
- [156] *Amelunxen, R.L.*: The Contact Cell – a future generation of flotation machines. Eng. Min. J., (April 1993), S. 36-37.
- [157] *Tils, H.M.G.C., u. M. Tels*: A study into fine particle flotation separation characteristics with application to centrifugal force field flotation cells. Int. J. Miner. Process., 36 (1992), S. 201-217.
- [158] *Bothe, C., u. K. Leschonski*: Untersuchungen zur pneumatischen Flotation von Feinstkohle im Erdschwere- und Fliehkraftfeld (I). Erzmetall, 46 (1993) 6, S. 356-363.
- [159] *Bothe, C., u. K. Leschonski*: Untersuchungen zur pneumatischen Flotation von Feinstkohle im Erdschwere- und Fliehkraftfeld (II). Erzmetall, 46 (1993) 7/8, S. 461-464.
- [160] *Leschonski, K., u. C. Bothe*: Centrifugal flotation of coal at particles sizes below 20 μm . In: Proc. XVIII. Int. Mineral Process. Congr., AusIMM, Sydney, Australia, 1993, S. 885-891.
- [161] *Heidenreich, C., Benker, B., u. K. Leschonski*: Experimentelle Untersuchungen zur Sortierung in einer Wehrflotationszentrifuge. Freiburger Forsch.-H., A 841 (1998), S. 162-175.
- [162] *Heiskanen, K., u. J. Kallioinen*: Effects of froth properties to the behaviour of flotation. In: Proc. XIII. Int. Mineral Process. Congr., Sydney, AusIMM, 1993, Vol. 3, S.

- 643-650. (Publications Serie 3/93)
- [163] *Ulan, W.W., Green, D., u. G.A. Kosick*: In-plant testing of the Outokumpu High Grade flotation cell. In: Proc. Column 91, Int. Conf. on column flotation (Hg. G.E. Agar, B.J. Huls und D.B. Hyma), CIM, Canada, 1991, Band II, S. 689-702.
- [164] *Kallioinen, J., Heiskanen, K., u. C. Garret*: Large flotation cell tests successful in Chile. Mining Engng., (Oct. 1995), S. 913-915.
- [165] *Heiskanen, K., u. J. Kallionen*: Size specific flotation concept – A case study on porphyry copper ore. In: Proc. XIX. Int. Mineral Process. Congr., San Francisco, USA, SME, Littleton, 1995, Band 3, Kap. 23, S. 195-198.
- [166] *Jonaitis, A.J.*: Design, development, application, and operating benefits of 100 m³ - Outokumpu TankCell flotation cells. In: Advances in flotation technology (Hg. B.K. Parekh und J.D. Miller), SME, Littleton, 1999, S. 371-380.
- [167] Wemco Smart Cell flotation machines. Prospekt, EIMCO Equipment, a Baker Hughes Company (Oct. 1996).
- [168] *Weber, A., Walker, C., Redden, L., Lehnski, D., u. W. Steve*: Scale-up and design of large-scale flotation Equipment. In: Advances in flotation technology (Hg. B.K. Parekh und J.D. Miller), SME, Littleton, 1999, S. 353-369.
- [169] *Rubio, J., u. J.A. Solari*: Lamellar flotation of a lead-zinc sulphide ore. Minerals Engng., 4 (1991) 2, S.133-140.
- [170] *Maxwell, J.R.*: Method of mineral separation by froth flotation. U.S. Patent 37014201, Oct. 31, 1972.
- [171] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Froth washing technology in mechanical flotation machines. In: Preprints XVII. Int. Mineral Process. Congr., Dresden, 1991, Band II, S. 203-215.
- [172] *Kaya, M. u. a.*: Industrial applications of froth washing in flotation. In: Proc. III. Int. Mineral Process. Symp. (Hg. G. Önal), Istanbul, 1990, S. 557-567.
- [173] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Evaluation of the potential of wash water addition and froth vibration on gangue Entrainment in mechanical flotation cells. In: Proc. II. Int. Mineral Process. Symp. (Hg. Y. Aytekin u. a.), Istanbul, 9-Eilmi University, Izmir, Turkey, 1988, S. 176-184.
- [174] *Kaya, M., u. A.R. Laplante*: Evaluation of the wash water addition in mechanical flotation cells by conductivity and tracer techniques. In: Proc. Processing of complex ores (Hg. G.S. Dobby und S.R. Rao), Pergamon Press, New York, 1989, S. 235-248.
- [175] *Degner, V.R., u. J.B. Sabey*: Wemco/Leeds flotation column development. In: Proc. Column 88 (Hg. K.V.S. Sastry), SME, Littleton, 1988, Kap. 29, S. 267-279.
- [176] Moore, D.C.: U.S. Patent 4.161.444; July 17, 1979.
- [177] *Gorain, B.K., Franzidis, J.P., u. E.V. Manlapig*: Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 4: effect of bubble surface area flux on flotation performance. Minerals Engng., 10 (1997) 7, S. 627-638.
- [178] *Gorain, B.K., Franzidis, J.P., u. E.V. Manlapig*: Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell. Part 5: validation of k-Sb relationship und effect of froth depth. Minerals Engng., 11 (1998) 7, S.615-626.
- [179] *Morris, R.M., u. G.A. Matthesius*: Froth flotation of coal fines: the influence of turbulence on cell performance. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 88 (1988) 12, S. 385-391.
- [180] *Laplante, A.R., Toguri, J.M., u. H.W. Smith*: The effect of air flow rate on the kinetics of flotation. Part 2: the transfer of material from the froth over the cell lip. Int. J. Miner. Process., 11 (1983) 3, S. 221-234.
- [181] *Schubert, H., Heidenreich, E., Liepe, F., u. T. Neeße*: Mechanische Verfahrenstechnik, 3. Aufl., Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990, 407 S..
- [182] *Anastassakis, G.N.*: Hydrodynamics of conventional flotation cells with external air blow and its effect on metallurgical results, In: Proc. XXI. Int. Mineral Process.

- Congr. (Hg. P. Massacci), Rom, Elsevier, Amsterdam, 2000, Band B, S. B8a64-B8a70.
- [183] *Bischofberger, C.*: Beitrag zum Einfluß der Hydrodynamik beim Flotationsprozeß. *Freiberger Forsch.-H.*, A179 (1986), S. 6-84.
- [184] *Schubert, H.*: Über die Hydrodynamik von Flotationsprozessen. *Aufbereitungs-Technik*, (1979) 5, S. 252-260.
- [185] *Neeße, Th., Schubert, H., u. H.-O. Möckel*: Turbulenzmessung in Mehrphasenströmungen gasförmig/flüssig und fest/flüssig mittels einer Piezosonde. In: *Proc. 2. Europäisches Symp. „Partikelmeßtechnik“*, Nürnberg, 1979, Fachvorträge, S. 431-445.
- [186] *Schubert, H.*: On the hydrodynamics and the scale-up of flotation processes. In: *Proc. II. Int. Mineral Process. Symp.* (Hg. Y. Aytekin), Makalelesé, Tzmir, Turkey, Oct. 4-6, 1988, S. 78-93.
- [187] *Neeße, Th., Schubert, H., Liepe, F., u. H.-O. Möckel*: Turbulenzmessungen in der Mehrphasenströmung fest-flüssig eines Rührapparates. *Chem. Techn.*, 29 (1977) 10, S. 544-548.
- [188] *Zlokarnik, M.*: *Rührtechnik: Theorie und Praxis*. Berlin, Springer, 1999, 339 S..
- [189] *Liepe, F., Meusel, W., Möckel, H.-O., Platzer, B. und H. Weißgärber*: Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden. Teil 4: Stoffvereinigen in Fluiden Phasen Ausrüstungen und ihre Berechnung. 1. Aufl., Leipzig, Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, 1988, Kap. 1, S. 11-36.
- [190] *Lohr, B.*: Untersuchung turbulenter Strömungsfelder in einem Rührreaktor technischer Größe, Dissertation, TU München, 1975, 113 S..
- [191] *Weiß, Th.*: Feinstkorneinfluß auf die Hydrodynamik von Flotationsprozessen, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1988, 111 S..
- [192] *Schubert, H.*: Über den Einfluß der Hydrodynamik auf die Flotationsprozesse. *Aufbereitungs-Technik*, (1982) 6, S. 306-315.
- [193] *Zachos, A., u. M. Kaiser*: Investigations into coal particle attachment on gas bubbles during froth flotation. In: *Proc. VII. Int. Conf. on coal science* (Hg. K.H. Michaelian), 1993, Band II, S. 495-498.
- [194] *Mühle, K., Domasch, K., u. T. Neeße*: Einige physikalische und chemische Aspekte der Flockung in turbulenter Strömung. *Freiberger Forsch.-H.*, A790 (1989), S. 115-128.
- [195] *Neeße, T., Mühle, K., u. A. Ivanauskas*: Zur physikalisch begründeten Modellierung des Flockungsprozesses. Teil V: Flockenaufbruch und Flockenerosion in turbulenten Strömungen. *Chem. Techn.*, 39 (1987) 7, S.292-295.
- [196] *Niemov, A.W.*: The suspension of solid particles. In: *Mixing in the process industries*, (Hg. N. Hornby, M.F. Edwards u. A.W. Niemo), 2 Aufl., Oxford, Butterworth-Heinemann, 1997, S. 364-393.
- [197] *Harris, C.C., Schnock, E.M., Khandrika, S. M. u. W.L. Pinzon*: Concentration profiles in a laboratory flotation machine: development of a simple sampling technique. *Powder Technology*, 35 (1983), S. 211-221.
- [198] *Degner, V.R.*: Development in large flotation machine development. In: *Proc. XIV Int. Mineral Process. Congr.*, CIM, Toronto, Canada, 1982, Paper VI-8, 19 S..
- [199] *Saberi, B., Schakourzadeh, K. u. P. Guigon*: Local solid concentration measurement by fibre optics: application to circulating fluidized beds. *Trans. IChemE*, 76 (1998) Part A, S. 748-752.
- [200] *Alba, F.*: Acoustic attenuation spectroscopy for particle sizing of high concentration dispersions. In: *Proc. 3. World Congr. on Particle Technol.*, Vortrag 10, 11 S..
- [201] *Williams, R.A., Jia, X., u. S.L. Mckee*: Development of slurry mixing models using resistance tomography. *Powder Technology*, 87 (1996), S. 21-27.
- [202] *Misha, B.K., Katti, A., u. S.P. Mehrotra*: Particle size monitoring by a nucleonic density gauge. *Minerals and Metall. Process.*, 16 (1999) 2, S. 37-40.

- [203] *Schubert, H., Bischofberger, C., u. P. Koch*: On the influence of the hydrodynamics in flotation processes. In: Preprints XIV. Int. Mineral Process. Congr., Canada, Toronto, CIM, Toronto, 1982, Paper IV.-15.1, 17 S..
- [204] *Deglon, D.A., Egya-Mensah, D., u. J.P. Franzidis*: Review of hydrodynamics and gas dispersion in flotation cells an South Africa platinum concentrators. *Minerals Engng.*, 13 (2000) 3, S. 235-244.
- [205] *Krishnan, S.V., u. Y.A. Attia*: Polymeric flocculants. In: *Reagents in mineral technology* (Hg. P. Somasundaran and B.M. Moudgil), Marcel Dekker, New York, 1987, S. 485-518.
- [206] *Schubert, H.*: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Band III, 2. Aufl., Leipzig, VED Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1984, S. 64-122, 169-246.
- [207] *Moudgil, B.M., u. S. Behl*: Flocculation in solid-liquid separation processes. In: *Flotation science and engineering* (Hg. K.A. Matis), New York, Marcel Dekker, 1995, Kap. 15, S. 415-439.
- [208] *Müller, H.M.*: Flockung. In: *Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden. Teil 3: Mechanisches Trennen in fluider Phase*, (Hg. S. Weiß u. a.), 1. Aufl. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1985, Kap. 5, S. 62-71.
- [209] *Attia, Y.A.*: Flocculation. In: *Colloid chemistry in mineral processing*, (Hg. J.S. Laskowski and J. Ralston), Elsevier, Amsterdam, 1992, Kap 9., S. 277-308.
- [210] *Slater, R.W., Clark, J.P., u. J.A. Kitchener*: 1. Chemical factors in the flocculation of mineral slurries with polymeric flocculants. *Proc. Brit. Ceram. Soc.*, 13 (1969), S. 1-12.
- [211] *Domasch, K., Mühle, K., u. A. Ivanauskas*: Zur physikalisch begründeten Modellierung des Flockungsprozesses, Teil III: Zum Zusammenhang zwischen Flockengröße und Flockenporosität. *Chem. Techn.*, 38 (1986) 9, S. 384-387.
- [212] *Friend, S.P., u. J.A. Kitchener*: Some physico-chemical aspects of the separation of finely divided minerals by selective flocculation. *Chemical Engng. Science*, 28 (1973), S. 1071-1080.
- [213] *Field, J. R.*: Some development associated with flocculants during the last decade. *Coal Preparation*, 4 (1987), S. 79-107.
- [214] *Gao, S., Ni, X., Cumming, R.H., Greated, C.A., u. P. Norman*: Experimental Investigation on Bentonite Flocculation in a Batch Oscillatory Baffled Column. *Separation Science and technology*, 33 (1998) 14, S. 2143-2157.
- [215] *Sengupta, D.K., Kan, J., AlTaweel, A.M., u. H.A. Hamza*: Dependence of separation properties on flocculation dynamics of kaolinite suspension. *Int. J. Miner. Process.*, 49 (1997), S. 73-85.
- [216] *Zachos, A., Kaiser, M., u. W. Merzkirch*: Particle dynamics during froth flotation of hardcoal determined by means of particle image velocimetry. In: *Proc. V. Int. Conf. Laser anemometrie: advances and applications* (Hg. J.M. Bessem et al.), Proc. SPIE 2052, 1993, S. 281-292.
- [217] *Liepe, F., Möckel, H.-O., u. H. Winkler*: Untersuchungen über Homogenisieren und über Turbulenz in Rührmaschinen. *Chem. Techn.*, 23 (1971) 4/5, S.231-237.
- [218] *Durst, F., Takeda, Y., u. J. Vorwerk*: Messungen momentaner Geschwindigkeitsprofile in einer pulsierenden Rohrströmung. *Verfahrenstechnik*, 26 (1992) 6, S. 50-54.
- [219] *Steidl, W.*: Experimentelle Untersuchungen zur Auslegung von Hyperboloidrührwerken in einem universellen Versuchsstand zur Simulation verschiedener Behältergeometrien. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1995, 135 S..
- [220] *Takeda, Y.*: Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method. *Exp. Thermal and Fluid Sc.*, 10 (1995), S. 444-453.
- [221] *Teufel, M., Trimis, D. Lohmüller, A., Takeda, Y., u. Durst, F.*: Determination of velocity profiles in oscillating pipe-flows by using laser doppler velocimetry and ultrasonic

- measuring devices. Flow Meas. Instrum., 3 (1992) 3, S. 95-101.
- [222] *Takeda, Y.*: Development of on ultrasound velocity profile monitor. Nuclear Engng. and Design, 126 (1991), S. 277-284.
- [223] *Bernhardt, C.*: Particle size analysis: classification und sedimentation methods. London, Chapman und Hall, 1994, S. 76 - 108.
- [224] *Farrow, J.B., u. J.D. Swift*: A new procedure for assessing the performance of flocculants. Int. J. Miner. Process., 46 (1996), S. 263-275.
- [225] *Slater, R.W., u. J.A. Kitchener*: Characteristics of flocculation of mineral suspensions by polymers. Discussions Faraday Society, 42 (1966), S. 267-275.
- [226] *Griec, N. M.*: Theory of flocculation. Mine and Quarry, 7 (1979) 5, S. 57-61.
- [227] *Ney, P.*: Zeta-Potentiale und Flotierbarkeit von Mineralen. Wien, Springer-Verlag, 1973, 214 S..
- [228] *Bellmann, C., u. H.-J. Jacobasch*: Elektrokinetische Methoden zur Charakterisierung von Partikeloberflächen. Freiburger Forsch.-H., A841 (1998), S. 224-238.
- [229] Firmenschrift Mantec Applied Sciences: ESA System, Zeta-potential determination in concentrated colloidal suspension, 12 S..
- [230] *Gründer, W., u. E. Kadur*: Das Verhältnis Schaumoberfläche zum Volumen bei Flotationszellen. Metall und Erz, 37 (1940) 18, S. 367-372.

Verzeichnis der Anlage

	Seite
Anlage 1: Bedeutung der Symbole in der Tabelle 2.2	163
Anlage 2: Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit sowie der Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit durch die Laserdoppleranemometrie Methode in einer Einphasenströmung (Wasser) in der Zellenbauart B bei unterschiedlichen Meßorten (FA und FB) und Zellenhöhen.(z).....	164
Anlage 3: Wichtigste Abmessungen und geometrische Verhältnisse der verwendeten Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme der 3,4-l-Flotationszellen.....	164

Anlage 1: Bedeutung der Symbole in der Tabelle 2.2

C_{ij}		Feststoffmasseanteil der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophilen Feststoffs j in der Trübezone
$C_{s,t}$	g/cm ³	Konzentration der i-ten Teilchengröße des Feststoffs j in der oberen Schicht der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone bei der Flotationszeit t
$C_{w,t}$	g/cm ³	Wassergehalt in der oberen Schicht der Trübezone direkt unterhalb der Schaumzone bei der Flotationszeit t
F_{ij}		Anteil der Komponente mit schneller Flotation in der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophoben Feststoffs j in der Trübezone
k	min ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante der Flotation
k_e	s ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante der Schaumentwässerung
k_f	min ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante der Komponente mit schneller Flotation
k_{ij}	min ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante der Flotation der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j
k_s	min ⁻¹	Geschwindigkeitskonstante der Komponente mit langsamer Flotation
$m_{f,t}$	kg	Masse des hydrophoben Feststoffs mit schneller Flotation in der Trübezone
$m_{Hj}(t)$	g	Masseausbringen des Feststoffs j, der während der Flotationszeit t durch Heterokoagulation in das Schaumprodukt gelangt ist
$m_{ij,t}$	kg	Masse der i-ten Teilchengrößenklasse des freien hydrophilen Feststoffs j in der Trübezone
$m_{mj}(t)$	g	Masseausbringen des Feststoffs j, der während der Flotationszeit t durch Trübemithführung und Heterokoagulation in das Schaumprodukt gelangt ist
$m_{s,t}$	kg	Masse des hydrophoben Feststoffs mit langsamer Flotation in der Trübezone
$m_{Tj}(t)$	g	Masseausbringen des Feststoffs j, der während der Flotationszeit t durch Trübemithführung in das Schaumprodukt gelangt ist
$m_{Tj}(0)$	g/s	Massestrom des Feststoffs j durch die Trübe-Schaum-Grenze ($z = 0$), der durch Trübemithführung durch diese Grenze übergegangen ist
$m_{Tj}(z)$	g/s	Massestrom des Feststoffs j bei der Schaumhöhe z , der durch Trübemithführung in den Schaum übergegangen ist
$m_{w,t}$	kg	Masse des Wassers in der Trübezone
$m_w(0)$	g/s	Massestrom des Wassers durch die Trübe-Schaum-Grenze
$m_w(t)$	g/s	Massestrom des Wassers ins Schaumprodukt bei der Flotationszeit t
P_{ij}		Flotierbarkeit der i-ten Teilchengrößenklasse des Minerals j
Q_{mij}	kg/min	Ausbringensrate für die Gesamtmasse der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophoben Feststoffs j durch Heterokoagulation und Trübemithführung
$Q_{Tij,f}$	kg/min	Masseausbringensrate der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophoben Feststoffs j durch Trübemithführung
Q_{Hij}	kg/min	Masseausbringensrate der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophoben Feststoffs j durch Heterokoagulation
Q_{Tij}	kg/min	Masseausbringensrate der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophilen Feststoffs j ins Schaumprodukt durch Trübemithführung
Q_w	kg/min	Masseausbringensrate des Wassers in das Schaumprodukt
R_{fij}	(%)	Ausbringen der Schaumzone der i-ten Teilchengrößenklasse des Minerals j
R_{Hij}	(%)	Ausbringen der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j in das Schaumprodukt während der Flotationszeit t durch Heterokoagulation
R_i	(%)	Ausbringen der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophilen Feststoffs ins Schaumprodukt durch Trübemithführung
R_{mij}	(%)	Gesamtausbringen der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j in das Schaumprodukt während der Flotationszeit t
R_{Tij}	(%)	Ausbringen der i-ten Teilchengrößenklasse des Feststoffs j in das Schaumprodukt durch Trübemithführung
R_w	(%)	Wasserausbringen im Schaumprodukt
R_{w0}	(%)	minimales Wasserausbringen, ab dem das Feststoffausbringen durch Trübemithführung der i-ten Teilchengrößenklasse proportional zum Wasserausbringen ist
S_B	min ⁻¹	Blasenoberflächenstrom bezogen auf die Querschnittsfläche der Zelle
S_{ij}		Anteil der Komponente mit langsamer Flotation, der i-ten Teilchengrößenklasse des hydrophoben Feststoffs j in der Trübezone
V_B	cm/s	Blasengeschwindigkeit
z	cm	Höhe oberhalb der Trübe-Schaum-Grenze
β		Empirischer Parameter der Schaummobilität und – stabilität
τ_{sch}	min ⁻¹	Mittlere Schaumverweilzeit

Anlage 2: Messung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der Effektivwerte der Schwankungsgeschwindigkeit durch die Laserdoppleranemometrie Methode in einer Einphasenströmung (Wasser) in der Zellenbauart B bei unterschiedlichen Meßorten (FA und FB) sowie Zellenhöhen (z)

Meß- orte	Meßpunkte			Geschwindigkeitskomponenten			$\beta_{rz/z}$ (Grad)	θ_r (Grad)
	Polarkoordinaten			Kompo- nente	mittlere Strömungs- geschwindigkeit	Effektivwerte der Schwan- kungsgeschwindigkeit		
	r (mm)	z (mm)	θ (°)					
FA	70.71	137	45.0	u_r	303.6	435.8	90.0	-153.1
				u_{rz}	303.6	435.8		
	70.71	122	45.0	u_r	54.7	111.2	49.5	-116.2
				u_{rz}	72.0	212.9		
	70.71	92	45.0	u_r	41.9	139.2	20.3	151.2
				u_{rz}	120.8	142.3		
	70.71	62	45.0	u_r	80.7	177.1	13.0	-144.3
				u_{rz}	359.4	193.4		
	70.71	32	45.0	u_r	146.1	341.3	16.1	-59.0
				u_{rz}	526.0	354.0		
FB	50.00	137	90.0	u_r	74.4	6.6	90.0	-90.0
				u_{rz}	74.4	6.6		
	50.00	122	90.0	u_r	84.2	180.9	90.0	-81.9
				u_{rz}	84.2	180.9		
	50.00	92	90.0	u_r	49.0	211.9	90.0	-55.9
				u_{rz}	49.0	211.9		
	50.00	62	90.0	u_r	40.6	117.4	90.0	-77.8
				u_{rz}	40.6	117.4		

Anlage 3: Wichtige Abmessungen und geometrische Verhältnisse der verwendeten Rotor-Stator-Strombrecher-Systeme der 3,4-l-Flotationszellen

Bauelemente	Abmessungen und geometrische Verhältnisse	Zellenbauart		
		A	C	D
Rotor*	Rotordurchmesser D_1 (cm)	5,5	5,5	7,5
	Einbauhöhe des Rotors H_{2m} (cm)	2,95	2,5	2,5
	Relative Einbauhöhe des Rotors H_{2m}/D_1 (cm)	0,20	0,17	0,17
	D_2/D_1	0,37	0,37	0,50
	Rotorfingerhöhe H_1 (cm)	3,0	3,0	1,9
	H_1/D_1	0,058	0,058	0,13
	H_1/D_2	0,54	0,54	0,25
	Fingerdurchmesser l (cm)	0,5	0,5	0,55
	l/D_2	0,09	0,09	0,07
	Fingerzahl z_R	12	12	16
Stator	Innendurchmesser des Statorrings D_3 (cm)	6,0	-	-
	Außendurchmesser des Statorrings D_4 (cm)	7,6	-	-
	Statorhöhe H_4 (cm)	3,0	-	3,0
	Einbauhöhe des Stators H_5 (cm)	1,2	-	0,03
	Anzahl der Statorblätter z_L	12	-	16
	D_3/D_1	0,40	-	-
	D_4/D_1	0,50	-	-
	H_4/D_1	0,20	-	0,2
	Breite der Statorblätter l_{st} (cm)	0,7	-	-
	Länge der Statorblätter c (cm)	-	-	2,2
	Länge der Statorblätter d (cm)	-	-	3,8
	Länge der Statorblätter e (cm)	-	-	6,1
Strombrecher	Länge der Strombrecher b (cm)	4,0	3,5	-
	Strombrecherhöhe H_7 (cm)	7,0	10,0	-
	Abstand zwischen Strombrecher und Zellenecke a (cm)	0,5	3,5	-
	Anzahl der Strombrecher z_s	4	4	-
	b/D_1	0,27	0,23	-
	H_7/D_1	0,47	0,67	-
	a/D_1	0,03	0,23	-

* Zellenbauart A und C mit Doppelfingerrotor und Zellenbauart D mit Einfachfingerrotor